

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**  
**Інженерно-хімічний факультет**  
**Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування**

До захисту допущено

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **О.В. Гондлях**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломний проект**  
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 6.050503 - Машинобудування (6.050502 - Інженерна механіка)  
на тему: Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень

---

Виконав (-ла) студент (-ка) 4 курсу, групи

ЛП-51-1  
(шифр групи)

Оніщук Олександр Анатолійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник доц. к.т.н. Чемерис А.О.

(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти з розділів:

---

ОХОРОНА ПРАЦІ доц. к.т.н. Ковтун І.М.

МОДЕРНІЗАЦІЯ доц. к.т.н. Щербина В.Ю.

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ ст. вик. Борщик С. О.

РЕЦЕНЗЕНТ \_\_\_\_\_

(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (підпис)

Київ      2019      рік

Національний технічний університет України

„Київський політехнічний інститут”

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра \_\_\_\_\_ хімічного, полімерного і силікатного машинобудування \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність \_\_6.050502- інженерна механіка (6.050503 - машинобудування) \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **О.В. Гондлях**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р

### **ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б.)

1. Тема проекту \_\_\_\_\_

керівник проекту \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ТБ та ОП	доц. Ковтун І.М.		
Модернізація	д.т.н., проф.. Щербина В.Ю.		
Тех. маш.	ст.викл. Борщик С.О.		

7. Дата видачі завдання:

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Отримання завдання для дипломного проекту.		
2.	Проходження переддипломної практики.		
3.	Здійснення пошуку патентів. Виконання кінематичних та параметричних розрахунків.		
4.	Обґрунтування модернізації.		
5.	Підготовка розділу «Пояснювальна записка»		
6.	Виконання розрахунків.		
7.	Підготовка розділу «Розрахунки»		
8.	Підготовка розділу «Технологія виготовлення деталі і монтажу вузла»		
9.	Робота над кресленнями в CAD-системах .		
10.	Захист дипломного проекту		

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврський дипломний проект на тему «Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень», виконав студент групи ЛП-51-1 Оніщук О.А., керівник – доц., к.т.н. – Чемерис А.О.

Метою дипломного проекту є Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень. Дипломний проект вміщує «Пояснювальну записку», що складається з 5 розділів. Загальний обсяг дипломного проекту становить: 72 с., 18 ., 16 джерел посилань.

Проект містить опис аміакопроводу через р. Дніпро, розглянуто його призначення.

У проекті виконано літературний пошук конструкцій мостового переходу з метою огляду варіантів різних рішень виконання мостових переходів і визначення кількості мостів які потребують оцінки залишкової міцності, подібних до переходу через р. Дніпро, мостових переходів.

Розрахунок залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень (з використанням 3D моделі) дозволяє зробити висновок про стан моста під час експлуатації на протязі сорока років.

В результаті проведених досліджень було виявлено слабкі місця мостового переходу.

За результатами роботи над дипломним проектом було опубліковані тези.

Також у бакалаврському дипломному проекті розглянуто вимоги охорони праці.

Ключові слова: АМІАКОПРОВІД, МОСТОВИЙ ПЕРЕХІД



## РЕФЕРАТ

Бакалаврский дипломный проект на тему «Оценка остаточной прочности аммиакопровода через р. Днепр от действия ветровых нагрузок», выполнил студент группы ЛП-51-1 Онищук А.А., руководитель - доц., к.т.н. - Чемерис А.А.

Целью дипломного проекта является Оценка остаточной прочности аммиакопровода через р. Днепр от действия ветровых нагрузок. Дипломный проект содержит «пояснительную записку», состоящий из 5 разделов. Общий объем дипломного проекта составляет: 72 с., 18., 16 источников ссылок.

Проект содержит описание аммиакопровода через р. Днепр, рассмотрены его назначения.

В проекте выполнен литературный поиск конструкций мостового перехода с целью осмотра варианте различных решений выполнения мостовых переходов и определения количества мостов требующих оценки остаточной прочности, подобных перехода через р. Днепр, мостовых переходов.

Расчет остаточной прочности аммиакопровода через р. Днепр от действия ветровых нагрузок (с использованием 3D модели) позволяет сделать вывод о состоянии моста во время эксплуатации в течение сорока лет.

В результате проведенных исследований было выявлено слабые места мостового перехода.

По результатам работы над дипломным проектом было опубликованы тезисы.

Также в бакалаврском дипломном проекте рассмотрены требования охраны труда.

Ключевые слова: Аммиакопровод, МОСТОВОЙ ПЕРЕХОД.

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis project on "Evaluation of the residual strength of the ammonia pipe through the river. Dnepr from the action of wind loads ", was performed by a student of the group LP-51-1 Onishchuk O.A., the head - associate professor, Ph.D. - Chemeris A.O.

The aim of the graduation project is to assess the residual strength of the ammonia pipeline through the river. Dnepr from the action of wind loads. The graduation project contains an "explanatory note", consisting of 5 sections. The total amount of the graduation project is: 72 p., 18., 16 sources of references.

The project contains a description of the ammonia pipeline through the river. Dnepr, considered its destination.

The project carried out a literary search for bridge crossing structures with the aim of inspecting a variant of various solutions for making bridge crossings and determining the number of bridges requiring residual strength assessment, similar to crossing over r. Dnieper, bridge crossings.

Calculation of the residual strength of ammonia through the river. Dnepr from the action of wind loads (using a 3D model) allows us to conclude about the condition of the bridge during operation for forty years.

As a result of the research, weak points of the bridge crossing were identified.

According to the results of the work on the graduation project theses were published.

Also in the bachelor degree project, the requirements of labor protection are considered.

**Keywords:** Ammonia pipeline, BRIDGE TRANSIT

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$A^i$  – площа скінченного елемента,  $m^2$ ;

$dN$  – приріст кількості циклів навантаження, цикл;

$e_{kl}^T$  – температурні деформації;

$[F]^{\vartheta}$  – матриця жорсткості СЕ;  $N$  – кількість циклів навантаження;

$e_{rp}^m$  – тензор деформацій;

$E$  – модуль Юнга, Па;

$\{f_m^{i'}\}$  – вектор навантажень, Н;

$F_s^i$  – функції приведення;

$\vec{r}$  – радіус-вектор;

$\xi_{mn}$  – компоненти градієнта переміщень, м/м;

$n$  – коефіцієнт запасу;

$P_n$  – поле вузлових узагальнених навантажень, що прикладаються до конструкції, Н;

$\Delta P$  – приріст навантаження, Н;

$r_n$  – поле вузлових нев'язок, Н;

$\sigma_{\max}$  – максимальне значення напруження, Па;

$R_i^p$  – величина реакції у вузлі, Н;

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$R_{p0.2}^T$  – межа текучості, Па;

$\vec{R}$  – радіус-вектор точки К після деформації;

$\Delta T$  – приріст температури, °С;

$\vec{u}$  – вектор переміщень, м;

$\sigma_l$  – поле накопичених напружень в СЕ, Па;

$V$  – об'єм тіла, м<sup>3</sup>;

$a_{kl}$  – коефіцієнт температурного розширення, 1/°С;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\sigma$  – еквівалентне напруження, Па;

$\sigma^{ij}$  – тензор напружень, Па;

### Основні скорочення

АПРОКС – автоматизована система міцнісних розрахунків оболонкових і комбінованих систем;

СЕ – скінчений елемент;

ПОМ – проблемно-орієнтована мова;

МЖ – матриця жорсткості СЕ;

МСЕ – метод скінчених елементів;

МССЕ – моментна схема скінчених елементів;

ІАТО – ітераційно-аналітична теорія оболонок;

ПОО – проблемно-орієнтований оператор;

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ПЕРЕЛІК ВКЛАДЕНЬ

Реферат з ключовими словами (укр. мова)

Реферат з ключовими словами (англійська мова)

Реферат з ключовими словами (російська мова)

Перелік позначень

I Пояснювальна записка до графічної частини /ПЗ/ .....25 с.

II Математична модель /ММ/ .....24 с.

III Розрахунки /РР/.....17 с.

Список використаних джерел та матеріалів

Додатки

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Оніщук О.А.				Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Чемерис А.О.						1	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. Контр.								
Затверд.	Гондляр О.В.							

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проекту**  
**на тему:**  
**«Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро**  
**від дії вітрових навантажень»**

**Київ 2019**

## ЗМІСТ

Вступ.....	2
1. Призначення та галузь застосування.....	3
2. Технічні характеристики базової конструкції.....	5
3. Літературний огляд стану питання.....	6
4. Опис базової конструкції, її основних частин.....	10
5. Охорона праці.....	14
ВИСНОВКИ.....	25

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Виконав	Оніщук О.А.				Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Чемерис						1	25
Реценз						КПІ ім. Ігоря		
Н. Контр.								
Затв..	Гондляр О.В.							

## Вступ

Одним з найважливіших хімічних речовин, яке використовують в різних сферах діяльності людини, є аміак. Щорічно цю речовину виробляють у величезних кількостях - більше 100 млн тон. Фізичні та хімічні властивості аміаку обумовлюють його застосування в різних областях, найбільш він використовується в хімічній промисловості.

Аміак є газоподібна речовина без кольору з дуже різким і неприємним запахом. Речовина отруйна. При тривалому впливі на людський організм здатний викликати набряки і ураження різних органів.

Аміак - це слабка кислота, він взаємодіє з кислотами, водою, а з металами здатний утворювати солі. Він здатний вступати в різні хімічні реакції з іншими хімічними речовинами. Наприклад, реакція безводного аміаку з азотною кислотою на практиці дозволяє отримати аміачну селітру, яка застосовується для виробництва добрив.

Аміак є відновником. Він здатний відновлювати різні метали з їх оксидів. Реакція взаємодії аміаку з оксидом міді дає можливість отримати азот.

В зв'язку з небезпечністю особливу увагу треба приділяти транспортуванню аміаку.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



## 1. Призначення та галузь застосування

Незважаючи на свою токсичність, аміак використовують в самих різних сферах. Основна частина виробленого аміаку йде на виготовлення різних продуктів хімічної промисловості. До таких продуктів відносяться:

- аміачні і аміачно-нітратні добрива (аміачні та нітратна селітра, сульфат амонію, хлористий амоній і ін.). Такі добрива підходять для різних сільськогосподарських культур.

- сода. Існує аміачний метод отримання кальцинованої соди. Аміак використовується для насичення сольового розсолу. Даний метод активно використовується для промислового виробництва соди.

- азотна кислота. Для її виробництва використовують синтетичний аміак. На даний момент промислове виробництво даної речовини засноване на явищі каталізу синтетичного аміаку.

- вибухові речовини. Нітрат амонію нейтральний до механічного впливу, але за деяких умов характеризується високими вибуховими властивостями. Саме тому він використовується для виробництва таких речовин. В результаті отримують амоніти - аміачні вибухові речовини.

- розчинник. Аміак, в рідкому стані, може використовуватися як розчинник різних органічних і неорганічних речовин.

- аміачна - холодильна установка. Аміак застосовується в холодильній техніці, як холодильного агента. Аміак не викликає парниковий ефект, він екологічно чистий і дешевше фреонів. Ці фактори обумовлюють застосування даної речовини в якості холодоагенту.

- нашатирний спирт. Його застосовують в медицині і в побуті. Дана речовина відмінно виводить плями з одягу різного походження, а також нейтралізує кислоти.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Оскільки аміак використовується в промисловості у великих обсягах і при цьому становить загрозу для навколишнього середовища, важливим завданням є безпечно його транспортування на значні відстані у великих обсягах. Всім цим вимогам відповідає трубопровід. Трубопровідний транспорт посідає перше місце серед інших видів транспорту по доставці вантажів на далекі відстані і при правильному проектуванні він є одним з найбезпечніших видів транспортування. Зазвичай лінія трубопроводу розміщена під землею. Однак часто існують штучні та природні перешкоди у вигляді річок, каналів, водосховищ т.п., які є економічно несприятливими для обходу трубопроводом. Часто встановлення підземних або підводних труб в цих умовах також неможливо. Це призводить до необхідності будівництва повітряних трубопроводів, серед яких найпоширенішими є мостові переходи різних типів. Проектування таких мостових переходів є дуже важливою задачею тому, що вихід з ладу мостового переходу через річку призводить до забруднення на великих територіях.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		4

## 2. Технічні характеристики базової конструкції

Мостовий перехід був побудований для прокладення аміакопроводу Тольятті-Одеса через р. Дніпро і має наступні основні показники:

- маса металоконструкції - 805 т;
- маса канатів -560 т;
- маса механічних вузлів и деталей - 47 т;
- загальна маса моста -1412 т;
- висота пілонів – 87 м;
- діаметр канатів головного кабелю – 71,5 мм;
- діаметр канатів вітрових відтяжок – 71,5 мм;
- габарити ферми жорсткості – 2,4х2,8 м;
- довжина ферми жорсткості – 720 м;
- підмостовий габарит – 13,5х640 м;
- бетон і залізобетон в опорах – 4587 м<sup>3</sup>.

Збірні елементи опор (бетонні та залізобетонні) мають вагу, що не перевищує 15 тон. Марка бетону опор 200 і 300, морозостійкість 200. Бетон для опор гідротехнічний по ГОСТ 4795-68.

Марки сталей елементів конструкції моста:

- Балка жорсткості:
  - 09Г2С (пояса, труби Ø219) ;
  - сталь 20 (інші трубчасті елементи);
  - 10Г2СД-12 (фасонки та фланці монтажних стиків).
- Пілони:
  - 14Г2-6 (стойки);
  - 10Г2СІД12 (нижній та середній ригелі);
  - 16Г2АФ-12 (верхній ригель);

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

### 3. Літературний огляд стану питання

Найпростішою і поширеною конструкцією при будівництві магістральних трубопроводів є балочні трубопровідні переходи. Однак основний їх недолік - обмеження прольоту через малу несучу здатність робочого трубопроводу. Щоб подолати це обмеження застосовують різні підтримуючі елементи у вигляді додаткових балок або ферм жорсткості. Такі заходи значно підвищують матеріаломісткість балкових трубопровідних переходів, що робить їх застосування для середніх і великих прольотів економічно неефективним.

Одним з рішень для перекриття великих прольотів є система в вигляді провисаючої нитки, в якій трубопровід, перекинутий через пілони, вільно провисає під дією власної ваги і ваги продукту, що транспортується. Ця система найбільш економічна, але має вкрай малу жорсткість. В системі типу провисаючої нитки виникають великі напруження в металі труб від розтягування та угину, вона найменш зручна для монтажу, в експлуатації і при ремонті. Тому в наш час такі конструкції застосовують в основному на відводах і лініях місцевого значення.

Найбільш економічними за витратами при будівництві, експлуатації і, особливо, при ліквідації аварійних ситуацій, є надземні трубопроводи з висячими і вантовими несучими системами. Такі конструкції є раціональними, так як виконують одночасно технологічну і несучу функції. Підтримуючі конструкції у вигляді сталевих кабелів з високоміцної сталі сприймають тільки розтягуючі зусилля, повністю реалізуючи при цьому свою несучу здатність. Завдяки раціональному використанню матеріалу висячі і вантові трубопровідні переходи дозволяють перекривати практично необмежені прольоти. Важливою перевагою таких конструкцій є також той факт, що, завдяки своїй гнучкості, вони малочутливі до різноманітних перевантажень, просіданням опор, сейсмічних впливів і т.п. ці переваги висячих і вантових систем зумовили широке застосування їх в як надземних трубопровідних переходів як в Україні, так і за кордоном, як для перекриття великих прольотів понад 300 м, так і для подолання невеликих

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

перешкод трубопроводами місцевого значення. На рис. 3.1 – 3.3 представлені фотографії трьох різних висячих трубопровідних переходів. На рис. 3.1 зображений перехід газопроводу через р. Амудар'я, побудований в 1964 і з'єднує сусідні області Узбекистану і Туркменії. Кабельна система даного переходу являє собою ґратчасту ферму з напружуваними похилими підвісами, що підтримує головний проліт довжиною 390 метрів. Горизонтальна жорсткість газопровідного переходу забезпечується вітровими кабельними фермами. Даний перехід є найбільшим переходом такого типу на території колишнього СРСР.



Рис. 3.1. Висячий перехід газопроводу через річку Амудар'я

На рис. 3.2 представлений трубопровідний перехід через річку Ельба в Чехії з однопрогоною висячої несучою системою і довжиною прольоту 186 м. Підтримуюча система переходу має трикутний вигляд і складається з несучого кабелю і двох стабілізуючих тросів.

Трубопровід для перекачування води при переході річки Ока в м. Орел (рис. 3.3) має класичну двопілонну висячу несучу систему з бічними відтягненнями і вертикальними підвісами, підтримують основний проліт довжиною 76 м. Ця система, не дивлячись на різноманіття висячих несучих систем, які запропоновані для застосування в мостовому будівництві, завдяки своїй простоті в даний час найбільш широко використовується для трубопровідних переходів.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Рис. 3.2. Висячий трубопровід через р. Ельба біля м. Усті-над-Лабем в Чехії



Рис. 3.3. Висячий трубопровід для перекачування води через р. Ока в м. Орел

Міст розташований на території річки Дніпро в районі с. Вовниги між містами Дніпропетровськ і Запоріжжя (Рис. 3.4). Міст для пропуску аміакопроводу введений в експлуатацію в 1979 році і представляє собою висячу пролітну будову довжиною 720м. Аміакопровод представляє собою металеву трубу діаметром

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

355,6x12,7мм, прокладену в захисному кожусі із металевої труби діаметром 530x8мм, розташованою в просторі металевої ферми жорсткості, підвішеному до головного кабелю.



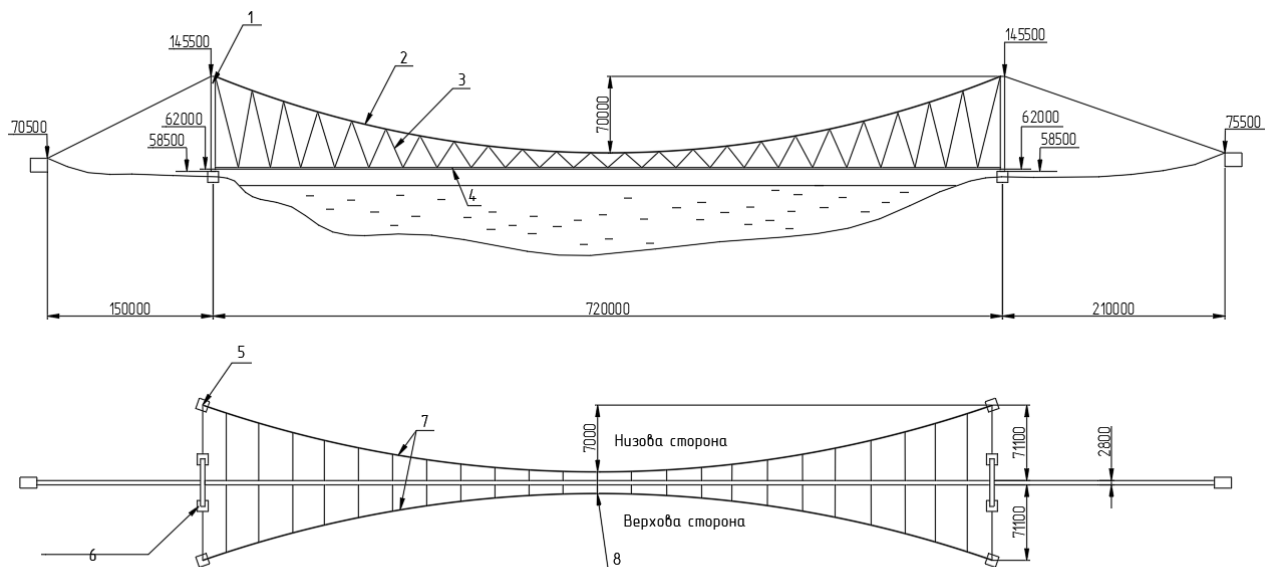
Рис. 3.4. Міст для пропуску аміакопроводу через р. Дніпро

Незважаючи на зручність і економічність висячих і вантових трубопровідних переходів, в даний час їх застосування стримується необхідністю проведення складних статистичних розрахунків з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності і вивчення поведінки велико-прольотних трубопроводів при дії динамічних навантажень.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## 4. Опис базової конструкції, її основних частин

На рис. 4.1 зображено мостовий перехід через р. Дніпро.



1. Пілон; 2. Кабель; 3. Похила підвіска; 4. Балка жорсткості;  
5. Залізобетонна опора пояса вітрової ферми; 6. Залізобетонна опора пілона;  
7. Вітровий пояс; 8. Нерухома опора поясів вітрової.

Рис. 4.1. Загальний вид

Міст являє собою висячу систему, основними елементами якої є:

- дві висячі вертикальні ферми прольотом 720 м, що складаються з несучих кабелів, розкосів (Похилих підвісок) і гратчастої балки жорсткості (рис. 4.2);
- два берегових пілона (рис. 4.3);
- двохпоясна горизонтальна вітрова система, що складається з поясів і горизонтальних відтяжок.

Вертикальні висячі ферми і горизонтальні вітрові ферми об'єднані в просторову систему похилими відтягненнями, балкою жорсткості і поперечними (в 4-х перетинах по довжині мосту) хрестовими зв'язками і розтяжками з канатних елементів (рис. 4.4).

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		





Рис. 4.2. Загальний вигляд моста.

Верхній пояс і похилі підвіски висячих ферм, балка жорсткості, пілон, вітрова ферма



Рис. 4.3. Пілон. Кабелі та похилі

підвіски висячих ферм

Висячі ферми з трикутною решіткою розбиті на 24 панелі по 30 м кожна. Висота ферми в середині прольоту 8,1 м, у пілона 84,1 м. Відстань між фермами 2,8 м.

Верхній пояс кожної висячої ферми (несучий кабель) складається з 6-ти основних канатів діаметром 71,5 мм і одного дистанційного каната. Кабелі спираються на сідлоподібні опори пілонів і переходять в берегові відтягнення.

Розкоси (похилі підвіски) висячих ферм виконані з одиночного каната діаметром 39,5 мм. Розкоси з боку балки жорсткості закінчуються гвинтовими стяжками для регулювання натягу похилих підвісок.

Балка жорсткості це просторова гратчаста конструкція, що складається з 2-х вертикальних ферм, верхні пояси яких з'єднані зв'язковою фермою, і системи поперечних і поздовжніх балок в рівні нижніх поясів вертикальних ферм (Рис. 4.5).

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Поздовжній профіль балки жорсткості виконаний по плавній кривій з будівельним підйомом. В рівні нижнього пояса на поперечних балках через кожні 12 м встановлені тороїдальні роликові опори. На них спирається трубчастий кожух діаметром 530 мм, всередині якого вміщено аміакопровід.



Рис. 4.4. Похилі підвіски і  
балка жорсткості



Рис. 4.5. Загальний вид балки  
жорсткості

Балка жорсткості в середині прольоту жорстко з'єднана з поясами вітрових ферм, а на обох кінцях моста має поздовжньо-рухливе спирання.

Вітрова система складається з звернених опуклостями один до одного параболічних (в плані) ферм, пояси яких виконані з 3-х сталевих канатів діаметром 71,5 мм кожен. Пояси ферм з'єднані з балкою жорсткості і з верхніми вузлами висячих ферм за допомогою канатних відтяжок (Рис. 4.6).

Пілони виконані у вигляді рами з похилими стойками. Висота пілона 87 м, ширина 17 м. Стойки виконані у вигляді просторових елементів з 2-х зварних двотаврів. Стойки пов'язані 2-мя проміжними ригелями.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Вузли з'єднання несущого кабелю з похилими підвісками виконані за допомогою 2-х деталей, обжимаючих канати, з'єднаних стяжними високоміцними болтами. До стяжним деталей кріпляться фасонки підвісок (рис. 4.7). До фасонки балки жорсткості підвіски кріпляться за допомогою гвинтових стяжок.



Рис. 4.6. Пояс вітрової ферми і середній вузол кріплення пояса до балки жорсткості



Рис. 4.7. Вузол верхнього пояса висячої ферми

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## 5. Охорона праці

В процес транспортування і видачі аміаку маємо справу із речовиною яку відносять до небезпечних речовин VI-класу небезпеки, високою та низькою температурою, установками, які працюють під тиском. Тому потрібно строго виконувати заданий режим, неперервно слідкувати за роботою апаратури, для забезпечення безпеки.

Цей розділ розроблено для дипломного проекту на тему: “Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р.Дніпро від дії вітрових навантажень”. При проектуванні було розроблено заходи, що забезпечують безпеку персоналу в процесі експлуатації та ремонтних робіт аміакопроводу у відповідності до Державних актів, що забезпечують виконання Закону України «Про охорону праці».

Наприклад, перед початком роботи з компресором необхідно перевірити стан і надійність кріплення арматури, захисного заземлення, контрольно-вимірювальних і сигнальних приладів, а також наявність і справність пломб на запобіжних клапанах, манометрах та іншій апаратурі, яка має бути опломбованою.

Кожний запобіжний клапан компресорної установки має бути відрегульований і опломбований, мати пристрій для його примусового відкриття під час роботи, натяжні гайки пружинних запобіжних клапанів також мають бути опломбованими. Небезпеку аварії на трубопроводі можуть спричинити гідравлічні удари, які відбуваються внаслідок конденсації насиченої пари і скупчення води в паропроводі при його прогріванні перед початком роботи.

Для запобігання гідравлічних ударів у паропроводах влаштовують дренажні пристрої, які являють собою відвідні лінії з вентилями і відкритими лійками.

Кріогенні речовини в холодильнику та інших установках чинять шкідливу дію на організм людини, особливо на очі і шкіру, яка стає крихкою (ламкою) подібною до опіків. Холодні гази можуть не пошкоджувати тканин тіла, але при сильній турбулентності вони відбирають тепло у більшій кількості, ніж організм

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

може його відновити. Тому при експлуатації кріогенних установок персонал, що обслуговує кріогенні системи, має працювати у відповідному спецодязі, рукавицях і протигазах. Відкривати фреонові апарати дозволяється тільки у захисних окулярах, а аміачні — у протигазах і гумових рукавицях, після того як тиск у системі зрівняється з атмосферним і залишиться постійним не менше 30 хв. Персонал має бути ознайомлений з правилами пожежної безпеки, що охоплюють як нормальний хід експлуатації, так і можливі аварійні ситуації.

При роботі використовують захисні засоби: захисні окуляри, гумові рукавички, прорезинений хімічностійкий одяг, маски та фільтруючі респіратори.

При ремонті та обслуговуванні аміакопроводу на мостових переходах працівники підвергаються наступним шкідливим та небезпечним виробничим факторам:

- робота на висоті;
- повітря робочої зони;
- електробезпека;
- пожежна безпека.

До виконання робіт на переході допускаються особи:

- що пройшли інструктаж і навчання безпечним методам роботи зі здачею іспитів на допуск до самостійної роботи;
- вміють користуватися індивідуальними засобами захисту;
- забезпечені відповідно спеціальності або посади спецодягом, спецвзуттям та перевіреними засобами індивідуального захисту (захисні шоломи, запобіжний пояс з двома ланцюгами, протигаз марки "КД", захисні окуляри, рятувальний жилет та ін.);
- вміють надати першу допомогу потерпілому;
- знають призначення первинних засобів пожежогасіння і правил гасіння пожежі;
- знають властивості аміаку, характер його дії на організм.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## 5.1. Робота на висоті

До роботи з ремонту споруд переходу допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд і допущені до роботи на висоті, а також самостійних верхолазних робіт над водою. Верхолазними вважаються всі роботи, які виконуються на висоті понад 3 метри від поверхні ґрунту, покриття, настилу або води, над якими проводяться роботи безпосередньо з конструкцій при їх монтажу та ремонті. При цьому основним засобом, що захищає від падіння з висоти є запобіжний пояс з двома ланцюгами. При роботі на висоті працюючі повинні мати інструментальні сумки або ящики для зберігання і перенесення інструмента і дрібних деталей, слюсарний інструмент повинен мати страхувальні ланцюги. Забороняється перенесення інструменту і дрібних деталей в руках, кишенях, за поясом тощо, а також укладання їх на конструкціях, майданчиках, настилах і оглядових ходах. Всі роботи на висоті обов'язково проводяться двома робочими. При роботі на висоті над водою додатково слід виконувати такі заходи безпеки: – на тих працюючих, що працюють на висоті над водою, повинні бути рятувальний жилет, захисна каска і запобіжний пояс з двома ланцюгами. – у радіусі не більше 25 метрів від місця знаходження працюючих на висоті над водою повинно постійно знаходитися маломірне моторне судно з працюючим двигуном, на якому разом з судноводієм повинен знаходитися працівник, що страхує, і первинні засоби надання першої допомоги потерпілому (рятувальні круги, кидальні кінці та ін.) – роботи на висоті виконуються під безпосереднім керівництвом ІТП, який несе відповідальність за виконання цих робіт. Забороняється підніматися на металеві конструкції моста і виконувати всі види робіт під час грози і при її наближенні, при силі вітру шість і більше балів (10 - 12 м/сек), ожеледі, сильному дощі, снігопаді і при температурі навколишнього повітря нижче мінус 25 градусів, а також у нічний час, за винятком аварійних ситуацій з дозволу головного інженера управління. При наявності особливо небезпечних і особливо шкідливих умов виробництва робіт перед їх виконанням робочим повинен бути виданий

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		16

письмовий наряд-допуск, що визначає безпечні умови роботи, із зазначенням в ньому небезпечних зон і необхідних заходів з техніки безпеки. Ступінь небезпеки робіт встановлюється в наряді-допуску. Наряд-допуск видається на термін, необхідний для виконання даного обсягу робіт. У разі перерви в виробництві робіт більше доби наряд-допуск анулюється і при поновленні робіт видається новий.

## 5.2. Хімічний склад робочої зони

Аміак являє собою отруйну речовину.

Патологічні процеси, що розвиваються під дією виробничих отрут, спричиняють в організмі людини до порушення функціонального і структурного стану, необхідного для його нормальної життєдіяльності.

Характер і ступінь таких змін під дією отрути обумовлений їх концентрацією (дозою), часом дії і періодом виведення (елюмінації) з організму. Токсичний ефект хімічних речовин залежить від індивідуальних властивостей особистості, що визначається станом здоров'я людини.

Промислові отрути можуть чинити на організм людини як місцеву, так і загальну дію.

Гігієнічне нормування шкідливих речовин проводять по гранично допустимих концентраціях (ГДК,  $\text{мг/м}^3$ ) у відповідності з нормативними документами: для робочих місць визначається гранично допустима концентрація в робочій зоні – ГДК<sub>рз</sub>. Гігієнічне нормування вимагає, щоб фактична концентрація забруднюючої речовини не перевищувала ГДК ( $C_{\text{факт}} \leq 1$ ).

ГДК<sub>рз</sub> – це максимальна концентрація, що при щоденній (крім вихідних днів) роботі у продовження 8 год чи при іншій тривалості, але не більш 41 год у тиждень, протягом усього стажу (25 років) не може викликати захворювань чи відхилень стану здоров'я, що виявляються сучасними методами досліджень у процесі роботи чи у віддалений період життя сучасного і наступних поколінь.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Для запобігання професійним отруєнням служать технологічні, технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи та засоби. Радикальним способом захисту є заміна отруйних неотруйними або менш токсичними речовинами, дотримання правил безпеки і виробничої санітарії, введення нових технологій, санітарно-гігієнічна експертиза хімічних речовин, їх гігієнічна стандартизація, комплексна механізація та автоматизація виробничих процесів.

Ефективним заходом профілактики, де використовують високо-отруйні речовини, є впровадження дистанційного управління або безперервності технологічних процесів, за рахунок яких усувається порушення герметичності обладнання.

Суттєво впливають на рівень професійної токсикології санітарно-гігієнічні є використанням автоматичної і контрольно-вимірювальної апаратури, яка сигналізує про наявність шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

До лікувально-профілактичних заходів належить обов'язкова реєстрація всіх випадків професійних отруєнь та їх розслідування з метою виявлення та усунення їх причин. Обов'язкові попередні й наступні медичні огляди, результати яких є підставою для розробки відповідних заходів запобігання та переведення працівників на іншу роботу і спеціального лікування.

Серед організаційних заходів законодавчо передбачена скорочена тривалість робочого дня, додаткові відпустки, безплатне спеціальне й лікувально-профілактичне харчування, підвищений рівень заробітної плати, скорочений термін виходу на пенсію.

За станом повітря виробничої зони необхідно здійснювати систематичний контроль з метою порівняння його з гігієнічними нормативами. Крім наведеного роботодавець має забезпечувати всіх працюючих ЗІЗ органів дихання, спеціальним одягом, спеціальним взуттям, засобами захисту рук, обличчя, очей.

*Засоби індивідуального захисту є допоміжною мірою захисту працівників від шкідливої дії професійних факторів. Засоби індивідуального захисту: на об'єктах, що використовують аміак, – промислові марки КД і М, ізольовані і*

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		18



киснево-ізолювані протигази. До засобів нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць ставляться освітлювальні прилади, світлові прорізи.

Додатково до технологічних заходів системами опалення й вентиляції повітряне середовище в приміщеннях доводиться до вимог санітарних норм і правил техніки безпеки.

### 5.3. Електробезпека

Відповідно до правил улаштування електроустановок за небезпекою електротравм відноситься до приміщення *без підвищеної небезпеки*.

В приміщенні застосовується *трифазна чотирипровідна мережа напругою 380 В з глухозаземленою нейтраллю*. У цьому випадку захисне заземлення не є досить надійним захистом щодо профілактики електротравм. Більш ефективним засобом попередження електротравм при замиканні на корпус у даному випадку вважається *занулення* – навмисне електричне з'єднання неструмовідних елементів електроустановки, які можуть опинитися під напругою в результаті замикання на корпус, з нульовим проводом.

*Система технічних засобів і заходів з електробезпеки.*

Основні технічні засоби і заходи що застосовуються для забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок в цеху включають:

- *ізоляція струмовідних частин* - забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок;

- *недоступність струмовідних частин* – застосовуються захисні огороження, закриті комутаційні апарати, неізолювані струмовідні частини розміщуються на висоті, недосяжній для ненавмисного доторкання до них інструментом, різного роду пристосуваннями, обмежується доступ сторонніх осіб в електротехнічні приміщення;

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- *блоківки безпеки* - унеможливлюють доступ до неізольованих струмовідних частин без попереднього зняття з них напруги, попереджують помилкові оперативні та керуючі дії персоналу при експлуатації електроустановок, не допускають порушення рівня електробезпеки та вибухозахисту електрообладнання;

- *засоби орієнтації в електроустановках* - дають можливість персоналу чітко орієнтуватися при монтажі, виконанні ремонтних робіт і запобігають помилковим діям.

#### *Система електрозахисних засобів.*

Основні електрозахисні засоби для роботи з електричним обладнанням в приміщенні:

- ізолювальні штанги;
- ізолювальні кліщі;
- електровимірювальні кліщі;
- покажчики напруги;
- діелектричні рукавички;
- інструмент з ізолювальним покриттям;
- діелектричне взуття;
- сигналізатори напруги;
- захисні огороження (щити, ширми);
- переносні заземлення;

### **5.4. Пожежна безпека**

Пожежну безпеку на підприємстві необхідно забезпечувати виконанням таких вимог:

- додержання правил безпечного проведення вогневих робіт;
- захист від статичної та атмосферної електрики і вторинних проявів блискавок;

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- дотримання правил зберігання горючих і легкозаймистих матеріалів, балонів зі стисненими і скрапленими газами;
- оперативне прибирання розлитих легкозаймистих рідин;
- автоматичне вмикання вентиляції в акумуляторних для видалення водню з приміщення під час заряджання акумуляторів;
- відсутність пропусків рідкого аміаку і пропан-бутанової суміші через арматуру і фланцеві з'єднання;
- наявність пожежної сигналізації;
- забезпечення первинними засобами пожежогасіння тощо.

На території, у будинках і спорудах магістрального аміакопроводу повинен бути встановлений відповідний до категорії їх пожежної небезпеки протипожежний режим.

Усі працівники підприємства повинні бути ознайомлені з вимогами щодо забезпечення протипожежного режиму на інструктажах, під час проходження пожежно-технічного мінімуму, а також на заняттях у системі виробничого навчання.

Працівники підприємств, які виконують ремонтні роботи на об'єктах магістрального аміакопроводу на договірних засадах, повинні дотримуватися встановленого протипожежного режиму.

Роботодавець визначає обов'язки працівників щодо забезпечення пожежної безпеки, призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих будинків, споруд, приміщень, ділянок та інших об'єктів магістрального аміакопроводу, за утримання та експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту.

Територія НС, РС, ЦРБ та інших об'єктів магістрального аміакопроводу повинна утримуватися у чистоті і систематично очищуватися від відходів

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

виробництва. Сміття, металобрухт, паливно-мастильні матеріали повинні зберігатися у спеціально відведених місцях.

До усіх будинків і споруд магістрального аміакопроводу повинен бути забезпечений доступ. Під'їзди, підходи до будинків і пожежних резервуарів, а також доступ до первинних засобів пожежогасіння та пожежних гідрантів завжди повинен бути вільним.

Територію протипожежних розривів між будинками не дозволяється використовувати для зберігання матеріалів, тари та для стоянки автотранспорту.

Не дозволяється залишати на відкритих площадках тару з легкозаймистими і горючими рідинами, а також балони зі стисненими і скрапленими газами, ацетиленові генератори з залишком невідпрацьованого карбїду кальцію.

Палити дозволяється лише в спеціально відведених за узгодженням з пожежною охороною місцях з написом „Місце для паління”, обладнаних бочкою з водою або ящиком з піском.

Усі електроустановки повинні бути захищені апаратами захисту від струмів короткого замикання та інших несправностей, які можуть призвести до пожежі. Плавкі вставки запобіжників повинні бути калібровані з зазначенням на клеймі номінального струму вставки (клеймо ставить завод-виготовлювач або електротехнічна лабораторія).

Для підтримання пристроїв захисту від блискавки у справному стані необхідно регулярно проводити їх ревізію: для будинків і споруд I та II категорій із захистом від блискавки – щорічно, для III категорії – не рідше одного разу на три роки зі складанням акта, в якому зазначають виявлені дефекти. Усі виявлені пошкодження і дефекти повинні бути негайно усунені.

Під час виконання зливо-наливних операцій аміаковози, автоцистерни скрапленого пропан-бутану підключають до заземлювального пристрою.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		22

Системи автоматичного виявлення і гасіння пожежі на насосних станціях магістрального аміакопроводу і в ЦПУ підтримують у роботоздатному стані і періодично перевіряють відповідно до інструкцій з їх експлуатації.

При автоматичному сигналі про загоряння в насосному або електричному модулі насосної станції (світловий і звуковий сигнали) у разі виникнення пожежі обслуговуючий персонал зобов'язаний залишити приміщення протягом 10 секунд і щільно зачинити двері.

При спрацьовуванні сигналізації вмикається система вуглекислотного пожежогасіння. Насосна станція автоматично відключається і переводиться на роботу через байпас.

У разі виникнення пожежі працівник зобов'язаний:

- терміново повідомити по телефону в пожежну охорону;
- інформувати оператора диспетчерської служби підприємства;
- евакуювати людей з території, де виникла пожежа;
- за необхідності викликати інші аварійно-рятувальні служби (медичну, газорятувальну тощо);
- приступити до гасіння пожежі за допомогою наявних засобів пожежогасіння.

Виробничі та інші приміщення повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння відповідно до Типових норм належності вогнегасників, затверджених наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 2 квітня 2004 року № 151, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 29 квітня 2004 року за № 554/9153.

Працівники підприємства повинні проходити навчання, інструктажі та перевірку знань з питань пожежної безпеки відповідно до типового положення

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

про інструктажі, спеціальне навчання та перевірку знань з питань пожежної безпеки на підприємствах, в установах та організаціях України.

### **5.5. Заходи щодо захисту працівників від травмування**

Працівники отримують захисний одяг – індивідуальний спецодяг – від впливу аміачних продуктів, газів, високих та низьких температур:

- бавовняні костюми ;
- рукавиці спеціальні , гумові технічні рукавички ;
- захисні окуляри ;
- захисні каски ;
- захисні щитки лицьові ;
- гумові чоботи, черевики МБС, підбиті цвяхами, що не дають іскри.

Знаходження обслуговуючого персоналу на робочому місці без спецодягу заборонено.

Весь обслуговуючий персонал установки зобов'язаний мати на робочому місці фільтруючі протигazi марки "К" захищаючі органи дихання від парів аміаку.

Індивідуальні фільтруючі протигazi зберігаються в спеціальних шафах з комірками. Передача протигазу однією особою іншій забороняється.

Крім індивідуальних протигазів на установці в спеціальній опломбованій шафі зберігається аварійний комплект газорятувальних засобів захисту: фільтруючі протигazi, шлангові протигazi. Аварійний запас протигазів береться з розрахунку найбільшої кількості людей, що працюють у зміні.

До засобів захисту від високих температур ставляться огорожувальні пристрої, термоізоляційне покриття, пристрої автоматичного контролю, сигналізації й дистанційного керування.

До засобів захисту від впливу хімічних факторів ставляться пристрої огорожувальні, герметизуючі, дистанційного керування, знаки безпеки.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		24

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту на тему «Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень» отримано такі результати:

1. Розглянуто галузі застосування аміаку;
2. Проаналізовано технічні параметри та характеристики моста;
3. Проведено літературний пошук, в результаті якого були проаналізовані мостові переходи, які схожі за конструкцією до мостового переходу аміакопроводу Тольятті-Одеса через р. Дніпро, розглянуто питання стану їх надійності;
4. Описано конструкцію мостового переходу через р. Дніпро;
5. Проаналізовано негативні фактори впливу на працівника ремонтної бригади під час проведення ремонтних робіт та розроблено заходи з охорони праці.

					ЛП-51(1).101696.01-70ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

**Математична модель**  
**до дипломного проекту**  
**на тему:**  
**«Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро**  
**від дії вітрових навантажень»**

**Київ 2019**



## Зміст

1.	Математична модель .....	2
2.	Опис програмного забезпечення.....	17
	ВИСНОВКИ .....	21

					ЛП-51(1).101696.01-70MM						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат							
Виконав		Оніщук О.А.			Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень	Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевірів		Чемерис А.О.						1		21	
Реценз						КПІ ім. Ігоря					
Н. Контр.											
Затв..		Гондляр О.В.									

# 1. Математична модель

Математичне моделювання - це опосередковане практичне або теоретичне дослідження об'єкта, при якому безпосередньо вивчається не сам цікавий для нас об'єкт, а деяка допоміжна штучна або природна система (модель), що знаходиться в деякій об'єктивній відповідності до об'єкту, який розглядається, здатна замінювати його в певних відносинах і дає при її дослідженні, в кінцевому рахунку, інформацію про сам модельований об'єкт.

## 1.1 Основні математичні співвідношення для шестигранного скінченного елемента, що використовується в математичній моделі

В роботі використовується моментна схема скінченних елементів (МССЕ) основні співвідношення якої наводяться нижче.

Кожній точці елемента, що визначений в системі координат  $z^i$  (Рис. 1.), призначається базис з унікальними координатними лініями. При цьому положення довільної точки після деформації визначається радіус-вектором:

$$\bar{R}(x^i) = \bar{r}(x^i) + \bar{u}(x^i) . \quad (1.1)$$

Для кожного значення  $x^i$  у виразі (1.1), отримаємо координатні поверхні якими тіло розбивається на скінченні елементи.

Розглянемо скінчений елемент (Рис. 1.1). Початок його системи координат отримуємо при  $x^i=0$ . Параметри скінченного елемента підбираються так, щоб їх

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						2
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

значення у вузлах дорівнювали  $\pm 1/2$ . Геометрію елементу охарактеризуємо компонентами метричного тензора  $g^{ij}$ . Завдяки введенню в опис елементу тензора  $g^{ij}$ , маємо можливість змінювати геометрію скінченного елемента. Для отримання рівнянь матриці жорсткості СЕ, цей елемент відображається на елемент одиничних розмірів у вигляді криволінійного паралелепіпеда, при цьому дотримуємось принципу ізопараметричності. Сусідні елементи контактують між собою у вузлах суміжних граней.

Розкладемо вектор переміщень за полілінійним законом:

$$u^n = \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u^n_{(s_1 s_2 s_3)} \varphi^{(s_1 s_2 s_3)}, \quad (1.2)$$

$$\text{де } \varphi^{(s_1 s_2 s_3)} = \prod_{\delta=1}^3 (s_{(\delta)} x^{(\delta)} + \frac{1}{2}), \quad (1.3)$$

$$s_i = \begin{cases} +1 & \text{при } \tilde{x}^i > 0 \\ -1 & \text{при } \tilde{x}^i < 0 \end{cases} - \text{величини, що показують розташування вузлових}$$

точок СЕ відносно місцевої системи координат;

$\tilde{x}^i$  - координати вузлових точок СЕ.

Матриця жорсткості скінченного елемента можна отримати використавши рівняння варіацій енергії деформації:

$$\delta W = \delta \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \mu g^{m\mu} g^{nv} \varepsilon_{\mu\nu} \varepsilon_{mn} dv. \quad (1.4)$$

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						3
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

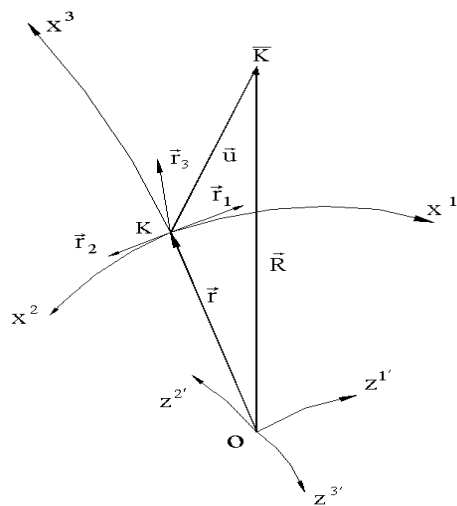


Рис. 1.1 Базисна  $(z^i)$  і місцева  $(x^i)$  системи координат.

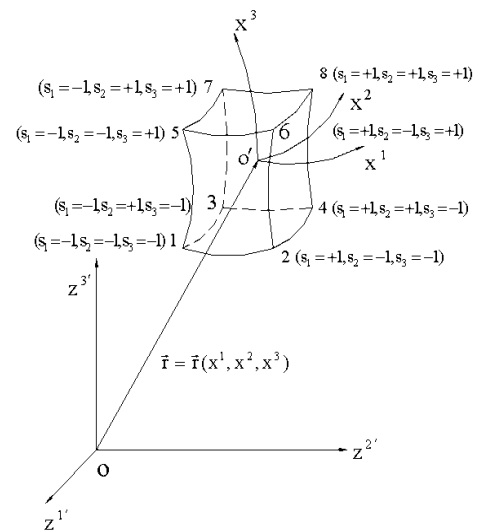


Рис. 1.1 Ізопараметричний СЕ з полілінійною апроксимацією переміщень.

Компоненти тензора деформацій набудуть вигляду:

$$\varepsilon_{mn} = \frac{1}{2}(\xi_{mn} + \xi_{nm}),$$

$$\text{де } \xi_{mn} = C_m^{j'} u_{,n}^{j'}. \quad (1.5)$$

Компоненти градієнта переміщень отримаємо шляхом розкладання в ряд Маклорена:

$$\xi_{mn} = e_{mn} + e_{mn,i} x^i + \frac{1}{2} e_{mn,ij} x^i x^j + \dots \quad (1.6)$$

$$\text{Тут } e_{mn} = \xi_{mn} \big|_{x^1=x^2=x^3=0}; \quad e_{mn,i} = \frac{\partial \xi_{mn}}{\partial x^i} \big|_{x^1=x^2=x^3=0}; \quad (1.7)$$

$$e_{mn,ij} = \frac{\partial^2 \xi_{mn}}{\partial x^i \partial x^j} \big|_{x^1=x^2=x^3=0}.$$

Компоненти з виразу (1.2) приведемо у вигляді :

$$|e_{mn} = C_m^{j'} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} \frac{\prod_{\delta=1}^3 (s_{(\delta)} x^{(\delta)} + \frac{1}{2})}{s_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}} s_n \Big|_{x^1=x^2=x^3=0} =$$

$$= \frac{1}{4} C_m^{j'} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} s_{(n)} ; \quad (1.8)$$

$$e_{mn,i} = \frac{1}{2} C_m^{j'} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} (1 - \delta_n^i) s_{(n)} s_{(i)} ;$$

$$e_{mn,ij} = C_m^{j'} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} (1 - \delta_i^j)(1 - \delta_n^i)(1 - \delta_n^j) s_{(n)} s_{(i)} s_{(j)} .$$

Компоненти деформацій можна визначити за повним виразом:

$$\xi_{mn} = \frac{1}{2} C_m^{j'} s_n \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{2} + s_i (1 - \delta_n^i) x^i + s_i s_j (1 - \delta_i^j)(1 - \delta_n^i)(1 - \delta_n^j) x^i x^j \right] \quad (1.9)$$

Для поліпшення збіжності рішення компоненти з виразу (1.9) можна записати у вигляді компонент градієнта переміщень:

$$\xi_{mn} \cong \xi_{mn} = \frac{1}{2} C_m^{j'} s_n \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{2} + s_i (1 - \delta_n^i)(1 - \delta_m^i) x^i + s_i s_j (1 - \delta_i^j)(1 - \delta_n^i)(1 - \delta_n^j) \delta_m^n x^i x^j \right]. \quad (1.10)$$

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						5
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

Похідні компонент переміщень для виразу (1.10) запишемо у вигляді:

$$u_{,n}^{i'} = \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{i'} \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^m) s_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(n)}^m) s_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}]} s_n . \quad (1.11)$$

Підставивши вираз (1.11) в (1.10) отримаємо новий вираз для компонент градієнта переміщень:

$$\xi_{mn}^* = C_m^{j'} \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^m) s_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(n)}^m) s_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}]} s_n . \quad (1.1)$$

Ідентичність виразів (1.10) та (1.12) легко доводиться.

Підставляючи тепер отримані компоненти тензора деформацій (1.12) у вираз варіації енергії деформації (1.4), маємо:

$$\delta W = \delta \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{1}{4} \mu g^{m\mu} g^{n\nu} (\xi_{\mu\nu}^* + \xi_{\nu\mu}^*) (\xi_{mn}^* + \xi_{nm}^*) dv =$$

					ЛП-51(1).101696.01-70ММ	Анк
						6
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
&= \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \{ \mu g^{m\mu} g^{n\nu} C_{\mu}^{j'} C_m^{i'} s_{\nu} r_n \delta(\sum_{\eta=\pm 1} \sum_{r_2=\pm 1} \sum_{r_3=\pm 1} u_{(\eta r_2 r_3)}^{i'}) \times \\
&\times \sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^{j'} \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^{(\mu)}) s_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(\nu)}^{(\mu)}) s_{(\nu)} x^{(\nu)} + \frac{1}{2}]} \times \\
&\times \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^{(m)}) r_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(n)}^{(m)}) r_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}]} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 = \\
&\sum_{s_1=\pm 1} \sum_{s_2=\pm 1} \sum_{s_3=\pm 1} u_{(s_1 s_2 s_3)}^j \delta(\sum_{\eta=\pm 1} \sum_{r_2=\pm 1} \sum_{r_3=\pm 1} u_{(\eta r_2 r_3)}^{i'}) \times \\
&\times \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} C_{\mu}^{j'} C_m^{i'} s_{\nu} r_n \mu g^{m\mu} g^{n\nu} \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^{(\mu)}) s_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(\nu)}^{(\mu)}) s_{(\nu)} x^{(\nu)} + \frac{1}{2}]} \times \\
&\times \frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1 - \delta_{(\varphi)}^{(m)}) r_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1 - \delta_{(n)}^{(m)}) r_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}]} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 = \\
&= \sum_{f=1}^{f=24} \sum_{\psi=1}^{\psi=24} F_{(f\psi)}^{\mathfrak{Z}} \delta u^{(f)} u^{(\psi)}, \tag{1.13}
\end{aligned}$$

де

$$F_{(f\psi)}^{\mathfrak{Z}} = \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} C_{\mu}^{j'} C_m^{i'} s_{\nu} r_n \mu g^{m\mu} g^{n\nu} \times$$

$$\frac{\prod_{\varphi=1}^3 [(1-\delta_{(\varphi)}^{(\mu)}) s_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}] \prod_{\varphi=1}^3 [(1-\delta_{(\varphi)}^{(m)}) r_{(\varphi)} x^{(\varphi)} + \frac{1}{2}]}{[(1-\delta_{(\nu)}^{(\mu)}) s_{(\nu)} x^{(\nu)} + \frac{1}{2}] [(1-\delta_{(n)}^{(m)}) r_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2}]} \times \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 \quad (1.14)$$

$F_{(f,\psi)}^{\mathfrak{Z}} = [F]^{\mathfrak{Z}}$  - матриця жорсткості СЕ розмірності 24х24.

## 1.2 Матриця жорсткості криволінійного шестигранного ізопараметричного скінченного елемента

В реальності елементи обладнання хімічних виробництв зазвичай являють собою складну пакетовану систему, в якій матеріали сусідніх шарів можуть значно відрізнятися за геометричними і фізико-механічними параметрами. Крім того об'єкти хімічного машинобудування часто працюють на відкритому просторі і тому знаходяться під впливом різноманітних факторів, таких як тиск, температура, вітрові навантаження, корозія, різноманітні пікові навантаження та ін. Все це висуває підвищені вимоги до вибору відповідного типу СЕ при чисельному дослідженні вище вказаних об'єктів або їх частин із застосуванням МСЕ.

Усім цим вимогам відповідає уточнений шестигранний ізопараметричний скінчений елемент з полілінійною функцією апроксимації переміщень.

Полілінійний закон апроксимації переміщень для нашого СЕ можна записати у вигляді:

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						8
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		



$$u_{i'}^s = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \prod_{r=1}^2 (1 + P_{rt} x^r) v_{i'}^{s(t)}, \quad (1.15)$$

$$\text{де } \{P_{1t}\}^T = \{-11-11\}; \quad \{P_{2t}\}^T = \{-1-111\}. \quad (1.16)$$

Численні дослідження показали, що така апроксимація забезпечує не тільки високу точність при чисельному моделюванні багаточарових та масивних тривимірних систем, але й забезпечує відносно невелику витрату часу ЕОМ. Для кожного елементу функції координат записується у вигляді:

$$x^{i'} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \prod_{r=1}^2 (1 + P_{rt} x^r) x^{i'(t)} \quad (1.17)$$

де  $x^{i'(t)}$  - декартові координати  $t$ -го вузла СЕ.

Функції деформації розкладаються в ряд Маклорена у відповідності з основними положеннями МССЕ. Співвідношення для шару елемента після виконання ряду перетворень записується у вигляді:

$$\begin{aligned} e_{\nu\nu}^m &= e_{\nu\nu}^{om} + e_{\nu\nu}^{\mu m} x^\mu \omega_{\mu\mu}^{\nu\nu}; \\ e_{33}^m &= e_{33}^{om} + e_{33}^{1m} x^1 + e_{33}^{2m} x^2 + e_{33}^{12m} x^1 x^2; \\ e_{12}^m &= e_{12}^{om}; \\ e_{\nu 3}^m &= e_{\nu 3}^{om} + e_{\nu 3}^{\mu m} x^\mu \omega_{\mu\mu}^{\nu 3}; \quad (\nu \neq \mu, \quad \mu = 1, 2) \end{aligned} \quad (1.18)$$

$$\text{де } e_{ij}^{om} = e_{ij}^m \Big|_{x^1=0, x^2=0}; \quad e_{ij}^{\mu m} = e_{ij, \mu}^m \Big|_{x^1=0, x^2=0}$$

$$e_{ij}^{\nu\mu m} = e_{ij, \nu\mu}^m \Big|_{x^1=0, x^2=0}. \quad (1.19)$$

Представимо співвідношення (1.18) в компактнішій формі, а саме:

$$e_{ij}^m = e_{ij}^{om} + e_{ij}^{\mu m} x^\mu \omega_{\mu\mu}^{ij} + e_{ij}^{\nu\mu m} x^\nu x^\mu \delta_{33}^{ij} \omega_\mu^\nu; \quad (1.20)$$

По аналогії з (1.18), тензор напружень для окремого шару СЕ записується у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_m^{\nu\nu} &= \sigma_m^{o\nu\nu} + \sigma_{\mu m}^{\nu\nu} x^\mu \omega_\mu^\nu; \\ \sigma_m^{m33} &= \sigma_m^{o33} + \sigma_{1m}^{33} x^1 + \sigma_{2m}^{33} x^2 + \sigma_{12m}^{33} x^1 x^2; \\ \sigma_m^{12} &= \sigma_m^{o12}; \\ \sigma_m^{\nu3} &= \sigma_m^{o\nu3} + \sigma_{\mu m}^{\nu3} x^\mu \omega_{\mu\mu}^{\nu3}; \quad (\nu \neq \mu, \quad \mu=1,2) \end{aligned}$$

$$\text{де } \sigma_m^{oij} = \sigma_m^{ij} \Big|_{\substack{x^1=0 \\ x^2=0}} = C_m^{ijkl} e_{kl}^{om};$$

$$\sigma_{vm}^{ij} = \sigma_{m,\nu}^{ij} \Big|_{\substack{x^1=0 \\ x^2=0}} = C_m^{ijkl} e_{kl}^{vm};$$

$$\sigma_{\nu\mu m}^{ij} = \sigma_{m,\nu\mu}^{ij} \Big|_{\substack{x^1=0 \\ x^2=0}} = C_m^{ijkl} e_{kl}^{\nu\mu m};$$

$$\text{або } \sigma_m^{ij} = \sigma_m^{oij} + \sigma_{vm}^{ij} x^\nu \omega_{ij}^{\nu\nu} + \sigma_{\nu\mu m}^{ij} x^\nu x^\mu \delta_{ij}^{33} \omega_\mu^\nu. \quad (1.21)$$

Для групи скінчених елементів принцип Даламбера формулюється у варіаційному вигляді:

$$\sum_{p=1}^P (\delta W_p - \delta A_p - \delta K_p) = 0, \quad (1.22)$$

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						10
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

де  $\delta W_p$  - варіація роботи деформацій р-го СЕ;

$\delta A_p$  - варіація роботи зовнішніх сил на переміщеннях СЕ;

$\delta K_p$  - варіація кінетичної енергії р-го СЕ;

P - загальна кількість СЕ.

Для вирішення геометрично нелінійних задач оболонкових тривимірних та комбінованих систем в даній роботі використовується модифікований метод Ньютона-Канторовича, який дозволяє формувати матрицю жорсткості лише один раз на кожному кроці навантаження.

Тензор напружень, що виникають на кожному кроці навантаження, записується у вигляді:

$$\sigma_{n^m}^{ij} = \sigma_{n-1^m}^{ij} + \Delta \sigma_{n^m}^{ij} \quad (1.23)$$

де  $\sigma_{n-1^m}^{ij}$  - тензор напружень на попередньому кроці;

$\Delta \sigma_{n^m}^{ij}$  - приріст напружень на поточному кроці в шарі m.

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Арк
						11
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

З урахуванням (1.23) перша складова виразу (1.22) набуде вигляду:

$$\delta W_p = \delta W_p^1 + \delta W_p^2 + \delta W_p^3 + \delta W_p^4 + \delta W_p^5, \quad (1.24)$$

$$\text{де } \delta W_p^1 = \sum_{m=1}^M \int_{V_p} C_m^{ijkl} e_{kl} \delta e_{ij} dV_p,$$

$$\delta W_p^2 = \sum_{m=1}^M \int_{V_p} \sigma_{ij}^{n-1} \delta e_{ij}^{Hm} dV_p,$$

$$\delta W_p^3 = \sum_{m=1}^M \int_{V_p} \sigma_{ij}^{n-1} \delta e_{ij}^m dV_p,$$

$$\delta W_p^4 = \sum_{m=1}^M \int_{V_p} C_m^{ijkl} e_{kl}^{Hm} \delta e_{ij}^m dV_p,$$

$$\delta W_p^5 = \sum_{m=1}^M \int_{V_p} C_m^{ijkl} e_{kl}^{Hm} \delta e_{ij}^m dV_p. \quad (1.25)$$

Третій доданок у виразі (1.25), в наслідок рівноваги між перенапруженням і навантаженням на попередньому кроці, не впливає на величину варіації енергії, 4-й та 5-й доданки містять члени вищого порядку малості, тому ними можна знехтувати, у підсумку вираз (1.24) набуде спрощеного вигляду:

$$\delta W_p = \delta W_p^1 + \delta W_p^2. \quad (1.26)$$

Контактну взаємодію між шарами в багатошарових конструкціях ефективніше за все моделювати за допомогою метода змінних жорсткостей. Тому при побудові лінеаризованої матриці жорсткості роблять допущення, що незмінність фізико-механічних характеристик шарів на кожному кроці інтегрування. Використовуючи це допущення запишемо вираз першого доданку в (1.26) з урахуванням (1.6):

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						12
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned} \delta W_p^1 = & \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \int_{h_{m-1}}^{h_m} \left\{ C_{cm}^{ijkl} e_{kl}^{om} \delta e_{ij}^{om} + \frac{1}{3} C_{cm}^{ijkl} e_{kl}^{vm} \omega_{ijkl}^{vvvv} \delta e_{ij}^{vm} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{9} C_{cm}^{ijkl} e_{kl}^{vum} \delta_{ijkl}^{3333} \omega_{\mu}^v \delta e_{ij}^{vum} \right\} \sqrt{g_m} dx^3. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Підставивши (1.15) в (1.19) отримаємо:

$$\begin{aligned} \delta e_{ij}^{om} &= \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \tilde{B}_{ijs(t)}^{mp'} \delta V_{p'}^{s(t)}, & \delta e_{ij}^{vm} &= \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \tilde{D}_{ijvs(t)}^{mp'} \delta V_{p'}^{s(t)}, \\ \delta e_{ij}^{vum} &= \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \tilde{A}_{ijv\mu s(t)}^{mp'} \delta V_{p'}^{s(t)} \end{aligned} \quad (1.28)$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{ijs(t)}^{mp'} &= C_{j'i}^{k'} F_{sk'}^{mp'} + C_j^{k'} \left\{ F_{sk',i}^{mp'} + F_{sk'}^{mp'} P_{it} \omega_i^3 \right\} \\ \tilde{D}_{ijvs(t)}^{mp'} &= (1 + P_{vt}) \left[ C_{j,i}^{k'} F_{sk',i}^{mp'} \right] + C_j^{k'} F_{sk'}^{mp'} P_{vt} P_{\mu t} \delta_i^{\mu} \omega_i^3 + \\ &+ C_{j'i}^{k'} F_{sk'}^{mp'} \left( P_{vt} \delta_i^v + P_{\mu t} \delta_i^{\mu} \right) \\ \tilde{A}_{ijv\mu s(t)}^{mp'} &= F_{sk',i v \mu}^{mp'} + F_{sk',i v}^{mp'} P_{\mu t} + F_{sk',i \mu}^{mp'} P_{vt} + F_{sj'}^{mp'} P_{vt} P_{\mu t} + \\ &+ F_{sk',v \mu}^{mp'} \left( P_{vt} \delta_i^v + P_{\mu t} \delta_i^{\mu} \right) + \left( F_{sk',v}^{mp'} \delta_i^v + F_{sk',\mu}^{mp'} \delta_i^{\mu} \right) P_{vt} P_{\mu t} \omega_v^{\mu}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

З врахуванням (1.28), остаточний вираз для першого доданку набуде вигляду:

$$\delta W_p^1 = \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} V_{t'}^{f(r)} \delta V_{p'}^{s(t)}, \quad (1.30)$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} = & \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \int_{h_m} C_{cm}^{ijkl} \left\{ \tilde{B}_{klf(r)}^{mt'} \tilde{B}_{ijs(t)}^{mp'} + \frac{1}{3} \tilde{D}_{klvf(r)}^{mt'} \tilde{D}_{ijvs(t)}^{mp'} \omega_{ijkl}^{vvvv} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{9} \tilde{A}_{kllv\mu f(r)}^{mt'} \tilde{A}_{ijv\mu s(t)}^{mp'} \delta_{ijkl}^{3333} \omega_{\mu}^v \right\} \sqrt{g_m} dx^3 \end{aligned} \quad (1.31)$$

- коефіцієнти матриці жорсткості криволінійного ізопараметричного шестигранного СЕ.

Вирази для другого доданку в (1.26)  $\delta W_p^2$  отримуємо аналогічно. Примемо припущення, що компоненти тензора напружень  $\sigma_{n-1}^{ij}$  можна розкласти в ряд типу

(1.23):

$$\sigma_{n-1}^{ij} = \sigma_{n-1}^{oij} + \sigma_{n-1}^{ij} x^v \omega_{ij}^{vv} + \sigma_{n-1}^{ij} x^v x^{\mu} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^v \quad (1.32)$$

$$\text{де } \sigma_{n-1}^{oij} = C_{n-1}^{ijkl} e_{n-1}^{cm} ;$$

$$\sigma_{n-1}^{ij} = C_{n-1}^{ijkl} e_{n-1}^{vm} x^{\mu} \omega_{vv}^{kl} ;$$

$$\sigma_{n-1}^{ij} = C_{n-1}^{ijkl} e_{n-1}^{v\mu m} x^v x^{\mu} \delta_{33}^{kl} \omega_{\mu}^v \quad (1.33)$$

Тензор скінчених деформацій також можна розкласти в ряд по аналогії з (1.19):

$$e_{ij}^{Hm} = e_{ij}^{Hom} + e_{ij}^{H\mu m} x^\mu \omega_{\mu\mu}^{ij} + e_{ij}^{H\nu\mu m} x^\nu x^\mu \delta_{33}^{ij} \omega_\mu^\nu. \quad (1.34)$$

Після дискретизації компоненти ряду (1.34) записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} e_{ij}^{Hom} &= \frac{1}{16} g^{kp} \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 \tilde{B}_{ijkpsftr}^{mp't'} V_{t'}^{f(r)} V_{p'}^{s(t)}, \\ e_{ij}^{H\mu m} &= \frac{1}{16} g^{kp} \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 \tilde{D}_{ijkpvsrt}^{mp't'} V_{t'}^{f(r)} V_{p'}^{s(t)}, \end{aligned} \quad (1.35)$$

$$e_{ij}^{H\nu\mu m} = \frac{1}{16} g^{kp} \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 \tilde{A}_{ijkp\nu\mu svft}^{mp't'} V_{t'}^{f(r)} V_{p'}^{s(t)},$$

$$\text{де: } \tilde{B}_{ijkpsftr}^{mp't'} = \tilde{B}_{ikst}^{mp'} \tilde{B}_{jpftr}^{mt'};$$

$$\begin{aligned} \tilde{D}_{ijkpvsrt}^{mp't'} &= \tilde{B}_{jpst}^{mp'} \tilde{D}_{ikvftr}^{mt'} + \tilde{B}_{ikftr}^{mt'} \tilde{D}_{jpvst}^{mp'}; \\ \tilde{A}_{ijkp\nu\mu svft}^{mp't'} &= \tilde{A}_{ik\nu\mu ftr}^{mt'} \tilde{D}_{jpvst}^{mp'} + 2 \tilde{D}_{ik\nu f}^{mt'} \tilde{D}_{jpvst}^{mp'} + \tilde{D}_{ik\nu f}^{mt'} \tilde{A}_{jpvst}^{mp'} \end{aligned} \quad (1.36)$$

На основі (1.33), (1.34), (1.35), другий доданок у виразі (1.33) запишемо таким чином:

$$\delta W_p^2 = \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} V_{t'}^{f(r)} \delta V_{p'}^{s(t)} \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} = & \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \int \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 g_m^{kp} \left\{ \sigma_{n-1}^{oij} \tilde{B}_{ijkpsftr}^{mt'p'} + \frac{1}{3} \sigma_{n-1}^{ij} \tilde{D}_{ijkpvsrt}^{mt'p'} \omega_{ij}^{\nu\nu} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{9} \sigma_{n-1}^{ij} \tilde{A}_{ijkpvsrf}^{mt'p'} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^{\nu} \right\} \sqrt{g_m} dx^3 V_{t'}^{f(r)} \delta V_{p'}^{s(t)} \end{aligned} \quad (1.38)$$

коефіцієнти матриці криволінійного ізопараметричного шестигранного СЕ.

Вираз для варіації енергії деформації скінченного елемента запишемо виходячи з (1.30) і (1.38):

$$\delta W_p = \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^4 G_{fsrt}^{t'p'} V_{t'}^{f(r)} \delta V_{p'}^{s(t)} \quad (1.39)$$

При цьому у виразі (1.39) коефіцієнти лінеаризованої матриці жорсткості СЕ визначаються за залежністю:

$$\begin{aligned} G_{fsrt}^{t'p'} = & \tilde{G}_{fsrt}^{t'p'} + \tilde{\tilde{G}}_{fsrt}^{t'p'} = \\ = & \frac{1}{4} \sum_{m=1}^M \int \left[ c_{cm}^{ijkl} \left( \tilde{B}_{klf(r)}^{nt'} \tilde{B}_{ijs(t)}^{mp'} + \frac{1}{3} \tilde{D}_{klyf(r)}^{nt'} \tilde{D}_{ijvs(t)}^{mp'} \omega_{ij}^{\nu\nu} + \frac{1}{9} \tilde{A}_{klvlf(r)}^{nt'} \tilde{A}_{ijv\mu s(t)}^{mp'} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^{\nu} \right) + \right. \\ & \left. + g_m^{kp} \left\{ \sigma_{n-1}^{oij} \tilde{B}_{ijkpsftr}^{mt'p'} + \frac{1}{3} \sigma_{n-1}^{ij} \tilde{D}_{ijkpvsrt}^{mt'p'} \omega_{ij}^{\nu\nu} + \frac{1}{9} \sigma_{n-1}^{ij} \tilde{A}_{ijkpvsrf}^{mt'p'} \delta_{ij}^{33} \omega_{\mu}^{\nu} \right\} \right] \sqrt{g_m} dx^3. \end{aligned} \quad (1.40)$$



## 2. Опис програмного забезпечення

Метою нашого дослідження є оцінка залишкової міцності трубопроводу від дії вітрових навантажень. Для виконання поставленої задачі потрібно конструкцію розрахувати на міцність. Для цього найкраще скористатися методом скінченних елементів. Цей метод в останні десятиліття отримав дуже широке поширення і став одним з основних методів розрахунку конструкцій. Це обумовлено універсальністю підходу, що лежить в основі МСЕ, яка полягає в поданні геометрії будь-якого тіла, що деформується у вигляді сукупності елементів найпростішої форми: трикутної, чотирикутної і ін. Елементи бувають одновимірними, плоскими і просторовими, з прямолінійними або криволінійними сторонами.

На даний момент є багато систем які використовують МСЕ для побудови та розрахунку різних конструкції (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, RFEM, SESAM, JCMsuite, NASTRAN, MARK, ASKA, NORSAM, системи IESS, а також МІРАЖ, ЛІРА, ДІАНА, СОНАР, ГАМА, КОРПУС, МАРС-ЕС, АПРОКС). Вданому проекті використовується програмний комплекс АПРОКС, тому що в нього відкрита та гнучка структура, що дає можливість додавати нові, або змінювати вже існуючі функціональні модулі, виходячи із власних потреб та вимог, а також це розробка кафедри ХПСМ інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського на якій я навчаюся.

Програмний комплекс АПРОКС був побудований на базі системи математичного забезпечення міцнісних розрахунків ПРОЧНОСТЬ-75.

Комплекс АПРОКС орієнтований на вивчення напружено-деформованого стану різних систем під впливом статичних і динамічних навантажень. За допомогою цього комплексу можна вивчити в класичних і уточнених постановках різні характеристики роботи систем і конструкцій, наприклад: великі переміщення, процес пластичної деформації матеріалу будівельних шарів,

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						17
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

походження і розвиток тріщин як товщини, так і конструкції для енергетичної, статичної та нестационарної динаміки навантаження, визначення спектру власних форм і частоти коливань системи.

Одним з основних понять комплексу APROKS є метод фрагментації, що систематично застосовується до дискретної моделі, програмних модулів, вхідної, операційної та вихідної інформації. Фрагментація дискретної моделі передбачає представлення оболонкової конструкції в сукупність її окремих частин - фрагментів, кожна з яких застосовується окремо до обчислювальної сітки, яка розкладає досліджувану область на скінченні елементи.

Для детального опису геометрично складних конструкцій широко використовується принцип квазірегулярності розрахункових сіток. Це полягає у застосуванні в кожному фрагменті регулярної сітки кінцевих елементів, утворених двома типами ліній, які можуть бути представлені на прямокутнику, що складається з квадратів. У той же час, коли конструкція апроксимується взагалі, можна порушити принцип закономірності, тобто у вузлах, спільних для декількох фрагментів, можна перетинати лінії більше двох сімей. Для кожного елемента інформаційні таблиці, що використовуються окремо, являють собою набір полів вихідних даних і полів операційних даних. Вихідною інформацією є координатне поле вузлів сітчастої поверхні, атрибутивне поле, що містить інформацію про топології дискретної моделі, області фізико-механічних характеристик, а на робочому полі переміщення, обмеження, знаки типів тріщин, їх орієнтації в просторі, поля значень силової функції інших

Такий підхід найбільш підходить для обчислення складних багат шарових структур з можливим змінним числом шарів. Крім того, інформаційна структура дискретної моделі на всіх етапах її обробки відповідає її розкладання на фрагменти в тому сенсі, що інформаційні поля, що належать фрагменту, існують у пам'яті комп'ютера у формі. єдиний файл і постійно знаходяться там. Цей файл

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Арк
						18
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

записується на зовнішні пристрої зберігання даних і копіюється в оперативну пам'ять, якщо це необхідно.

Аналогічно, в складній програмній структурі APROKS відображає фрагментацію дискретної моделі. Наприклад, деякі модулі організовують обробку всієї дискретної моделі - шляхом контактування програмних блоків для обробки конкретних фрагментів, а також підпрограм, що реалізують індивідуальну ЕС-обробку.

Інформація, що задається, для APROKS записується у вигляді програми, написаної на проблемно-орієнтованій мові. Одним з фундаментальних принципів, викладених в ПОМ АПРОКС, є модульність програм, що дозволяє розрізняти в різних модулях опис досліджуваних об'єктів і алгоритми розрахунку. Такий підхід забезпечує універсальність алгоритмів пошуку та їх незалежність від обчислювальних об'єктів. На цьому етапі в ПОМ АПРОКС була введена наступна ієрархія модулів опису модулів.

Модуль для найменшого рівня об'єктів, що використовуються для опису є модуль фрагмент. Цей модуль містить всю інформацію про сітку кінцевих елементів, фізичні та механічні характеристики, граничні умови тощо. Модулі фрагмент різняться за назвою, що приписується цьому фрагменту, що дозволяє розпізнати його, а також по типу.

Фрагмент, як і будь-який інший модуль APROKS, складається з розділів, що представляють набір проблемно-орієнтованих операторів, що описують топологію фрагмента, його геометрію, граничні умови, властивості тощо. У розрізі є оператори, арифметичні вирази та оператори з присвоєнням проблем. Важливо відзначити, що інформацію про фрагмент можна визначити за декількома незалежними параметрами, що дозволяє створювати не тільки окремі примітиви, але й великі сукупності параметризованих об'єктів.

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						19
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

Фрагментні модулі, як правило, описують не всю структуру в цілому, а лише її частину. Модуль "КОНСТРУКЦІЯ" передбачає інтеграцію фрагментів в єдину конструкцію.

Модулі конструкція відрізняються за назвою і можуть містити оператора локфрагмент, який повинен містити список фрагментів із зазначенням їх індексів і фактичних параметрів. Крім того, передбачена можливість викликати конструкцією інших конструкцій. У цьому випадку всі фрагменти, що входять до модуля нижнього рівня, автоматично включаються до верхнього модуля. Таким чином, на основі ПОО АПРОКС можна побудувати дерево конструкцій, яке підходить для реалізації декількох складних алгоритмів для обчислення комбінованих систем. за аналогією з модулем фрагмент, в модулі конструкція також реалізовно можливість параметризації набору об'єктів і передачі цих параметрів у фрагменти.

Розроблено оператори модуля АЛГОРИТМ для створення різних алгоритмів розрахунку структур як частини АPROKS. Алгоритм складається з розділів, що містять в собі проблемно-орієнтовані оператори, оператор присвоювання й оператор передачі керування.

Така проблемно-орієнтована мовна структура ввела поняття бази даних об'єктів і бази даних алгоритму. В базі даних об'єктів зазвичай зберігаються параметризовані програми, що визначають інформацію про досліджуваний об'єкт, а в базі даних алгоритму знаходяться програми формалізації, записані на ПОМ АПРОКС.

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Анк
						20
Зм	Анк	№ докум	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту на тему «Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень» отримано такі результати:

1. Розглянуто суть математичної моделі.
2. Обрано для розрахунків метод скінченних елементів;
3. Було виявлено переваги програмного забезпечення АПРОКС над його конкурентами;

					ЛП-51(1).101696.01-70MM	Арк
						21
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

**Розрахунки**  
**до дипломного проекту**  
**на тему:**  
**«Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро**  
**від дії вітрових навантажень»**

**Київ 2019**

## Зміст

1.	Побудова моделі конструкції мостового переходу .....	2
2.	Розрахунки АПРОКС .....	10
3.	Розрахунок підструктури.....	14
	ВИСНОВКИ .....	17

					ЛП-51(1).101696.01-70PP						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат							
Виконав		Оніщук О.А.			Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірів		Чемерис А.О.								1	17
Реценз								КПІ ім. Ігоря			
Н. Контр.											
Затв..		Гондляр О.В.									

## 1. Побудова моделі конструкції мостового переходу

Використовуючи команду New в меню File викликаю діалогове вікно, в якому задаємо ім'я нашого проекту (Рис. 1.1)

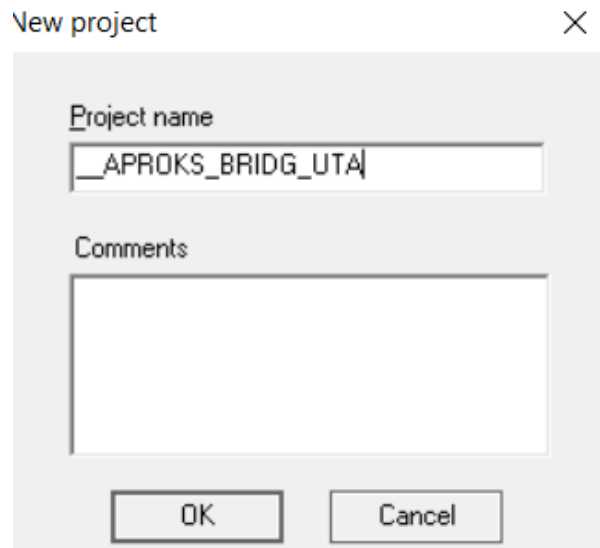


Рис. 1.1. Діалогове вікно New project

Далі після натискання на кнопку ОК, робочий простір ділиться на 2 частини (дерево елементів та простір для виводу конструкції). Використовуючи команду Save зберігаю проект. Проект АПРОКС - це файл, в якому знаходиться опис аналітичної або графічної інформації у спеціальному форматі (\*.aps). У процесі роботи він зберігається в оперативній пам'яті комп'ютера, а для тривалого зберігання використовують диски.

В верхній лівій частині екрана знаходжу дерево конструкцій (\_aprors\_bridg\_uta) – натискаю правою кнопкою миші на нього – з'являється меню (Рис. 1.2) в якому обираю команду Add Fragment. Після цього з'явиться діалогове вікно, у якому ввожу значення параметрів скінчено-елементного фрагменту (Рис. 1.3).

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



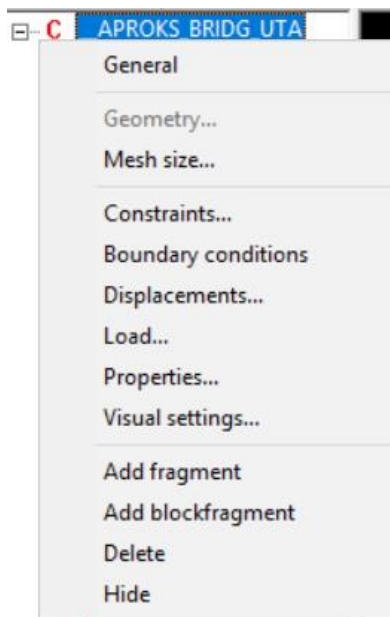


Рис. 1.2. Меню

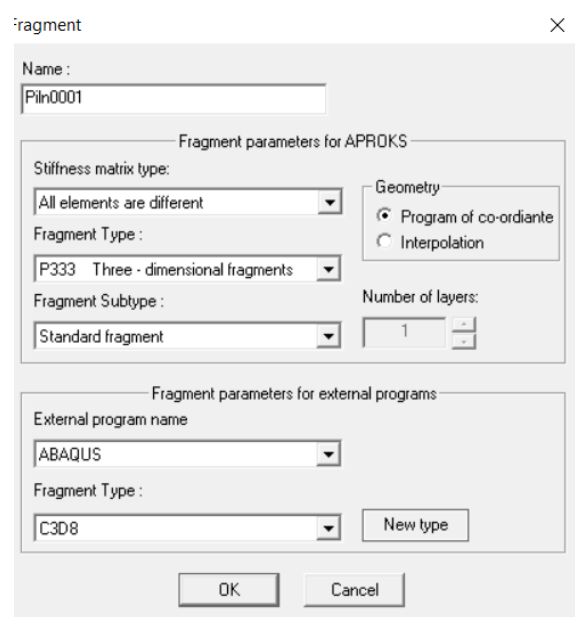


Рис. 1.3. Діалогове вікно Fragment

Натискаю кнопку ОК і з'являється діалогове вікно Geometry, в якому задаю програму координат геометричної моделі – LIC\_ALFA\_13 (Рис. 1.4) і заповнюю таблицю параметрів.

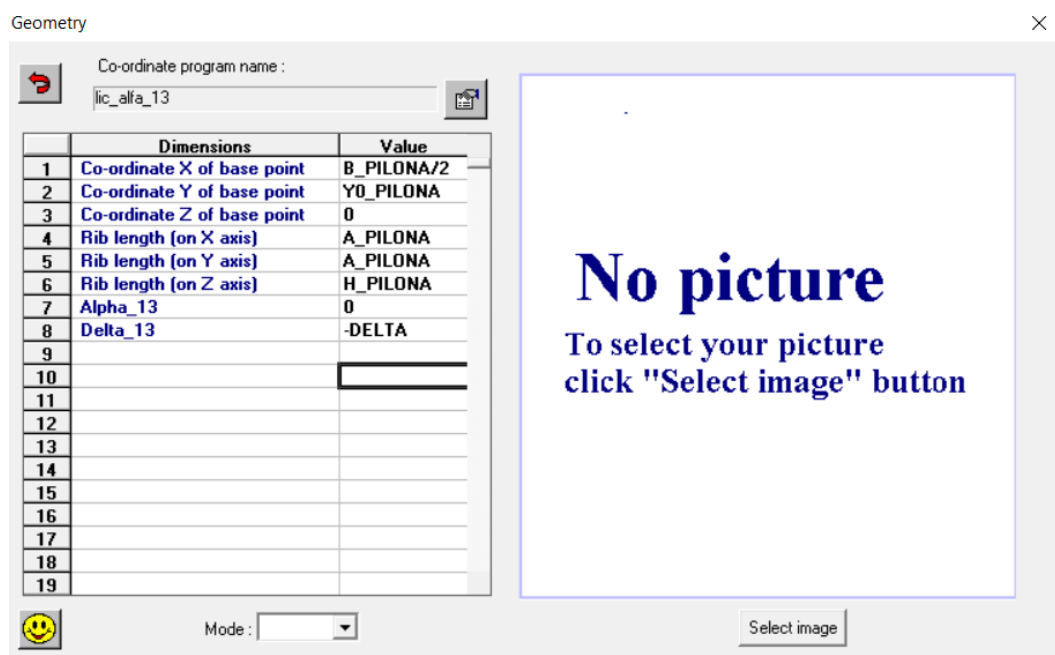


Рис. 1.4. Діалогове вікно Geometry

Натискаю кнопку у вигляді смайлика і переходжу до діалогового вікна Size of mesh region, в ньому заповнюю поля, які визначають густину скінченно-елементної сітки конструкції (Рис. 1.5).

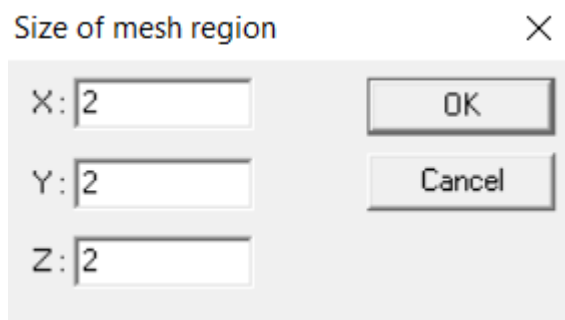


Рис. 1.5. Діалогове вікно Size of mesh region

Після закінчення побудови геометричної моделі переходжу до створення змінних, для цього використовую вікно Variable (Рис. 1.6).

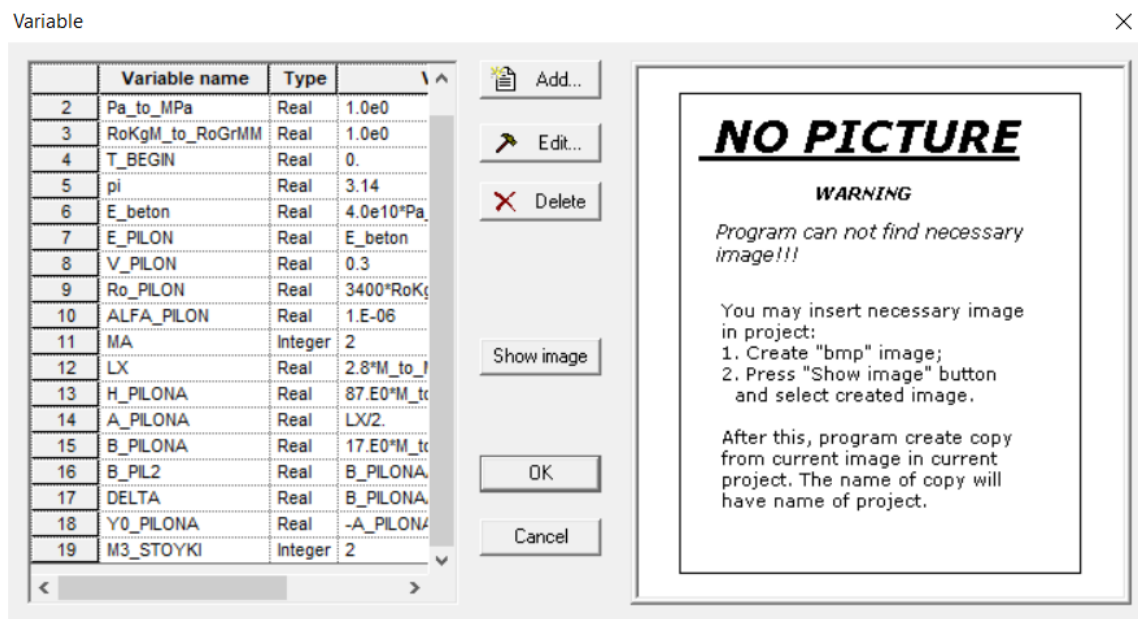


Рис. 1.6. Діалогове вікно Variable

Після того як створив змінні переходжу до вікна Properties => Elasticity та вводжу фізико-механічні параметри матеріалу, з якого виготовлено досліджувану балку (Рис. 1.7).

Після проведення такого порядку дії отримуємо результат (Рис. 1.8), на простір для виводу конструкції з'явилася частина пілона.

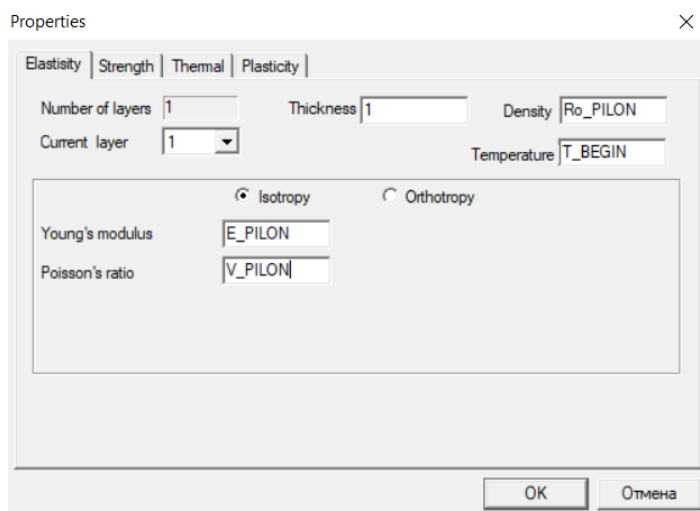


Рис. 1.7. Діалогове вікно Properties

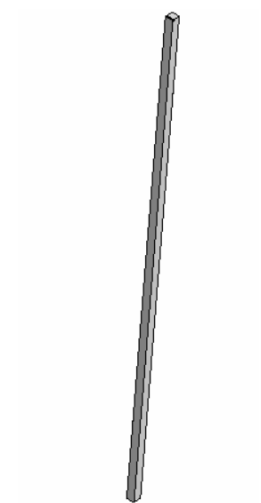


Рис. 1.8. Елемент пілона

Аналогічно будуємо всі елементи і отримуємо модель конструкції пілона (Рис. 1.9).

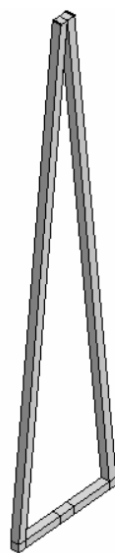


Рис. 1.9. Модель пілона

Далі на нижню частину пілона накладаю в'язі на одну сторону скориставшись діалоговим вікном Constraints (Рис. 1.10). У вікні Constraints

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

=> Add => Constraint Section обираємо наступні параметри накладання в'язей (Рис. 1.11). Дану операцію виконую для необхідних елементів.



Рис. 1.10. Діалогове вікно Constraints

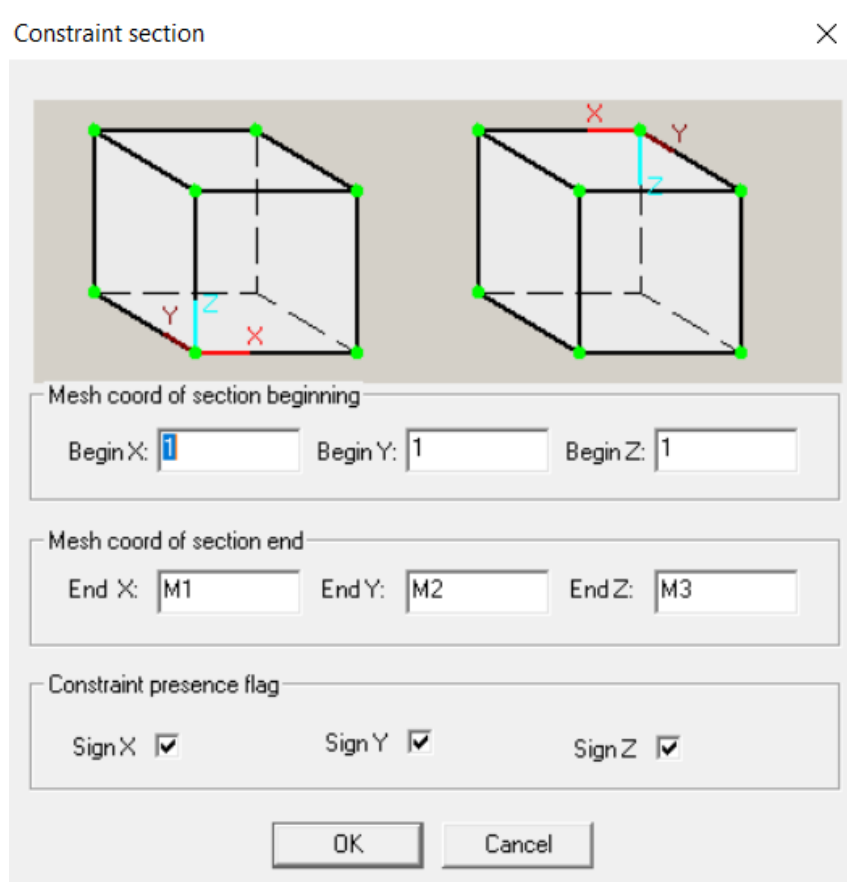


Рис. 1.11. Параметри накладання в'язей

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ЛП-51(1).101696.01-70PP

Арк.  
6

Далі я будував секцію ферми (Рис. 1.12)

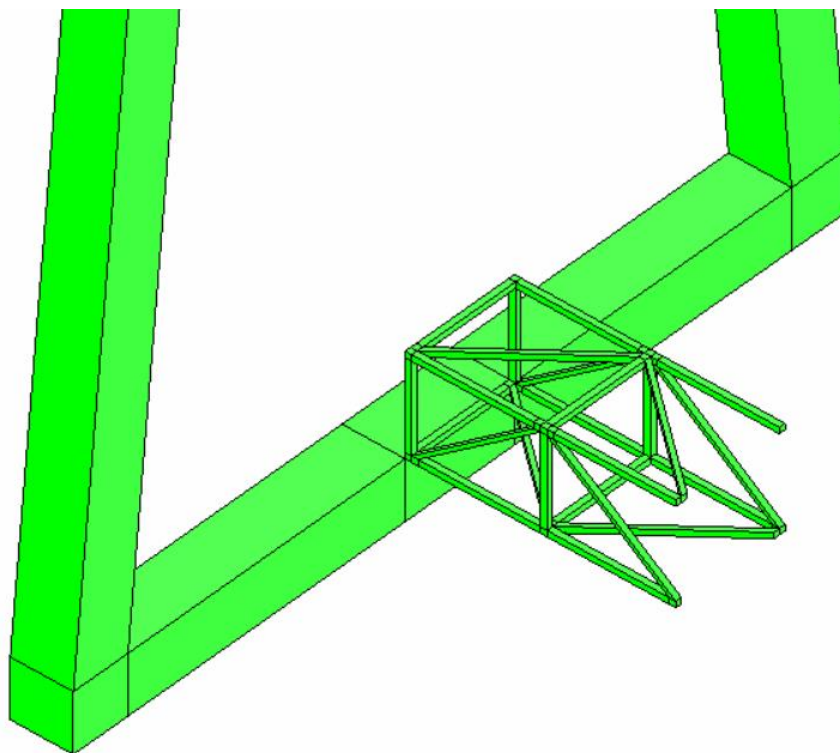


Рис. 1.12. Секція форми

За допомогою програмного коду розповсюджую секцію на довжину ферми жорсткості мостового переходу (Рис. 1.13).

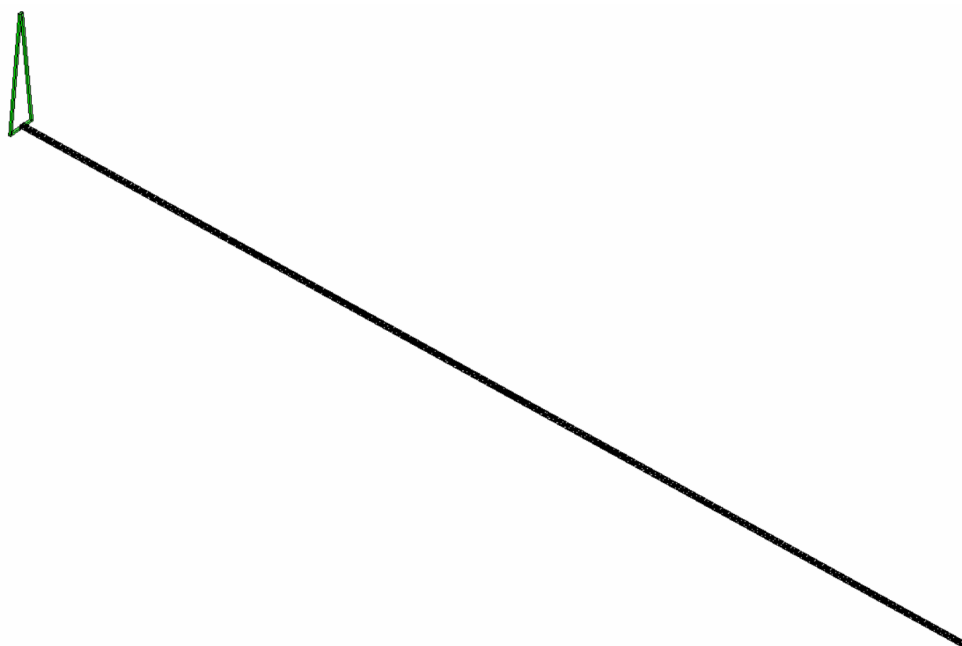


Рис. 1.13. Ферма жорсткості та пілон

Таким же чином будуюмо другий пілон (Рис. 1.14).

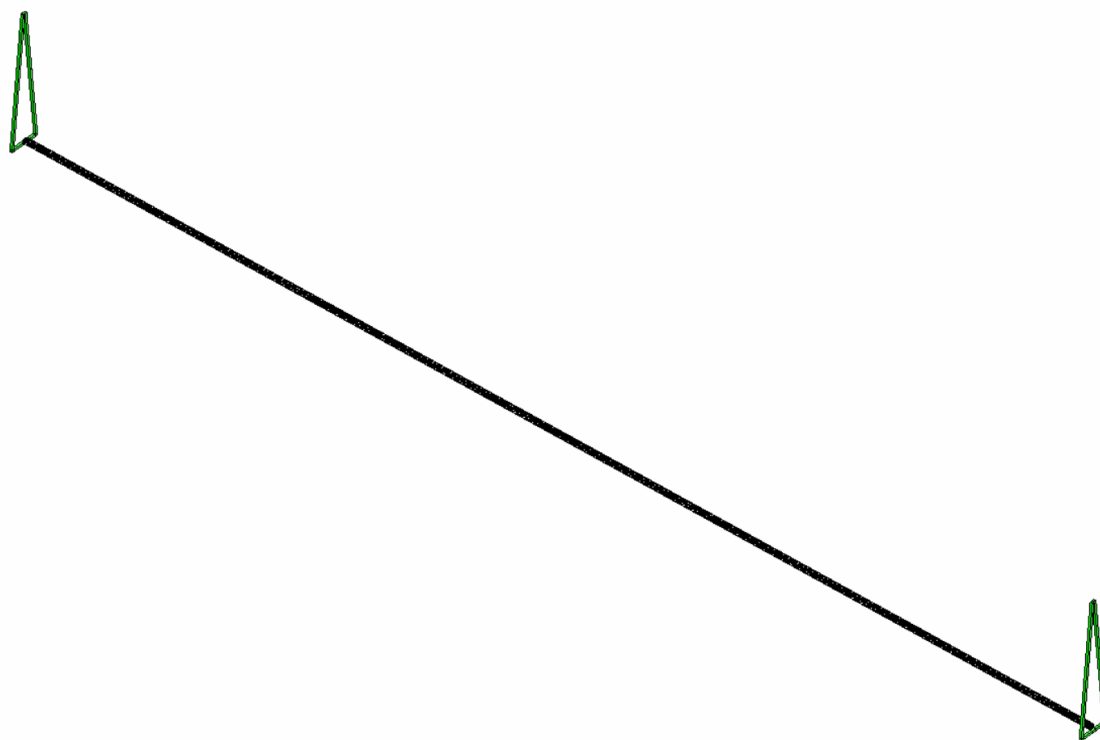


Рис. 1.14. Пілони та ферма жорсткості

Для завершення моделі конструкції не вистачає вантової системи, яку добудовую використовуючи всі операції, які вказані вище. Отримую модель мостового переходу аміакопроводу (Рис. 1.15).

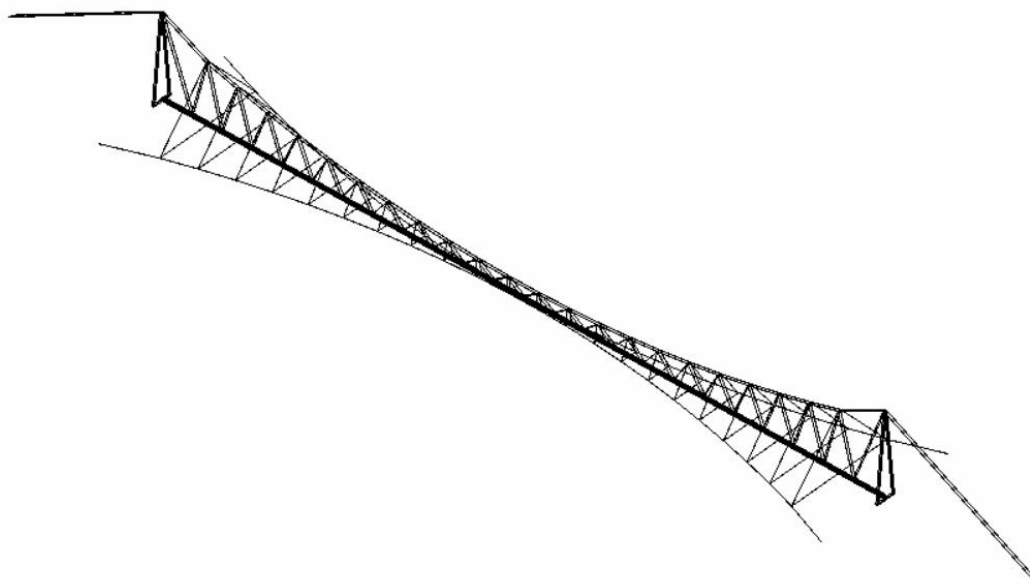


Рис. 1.15. Модель мостового переходу аміакопроводу

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Після отримання готової моделі моста я переходжу в меню Load для створення модель навантаження (Рис. 1.16).

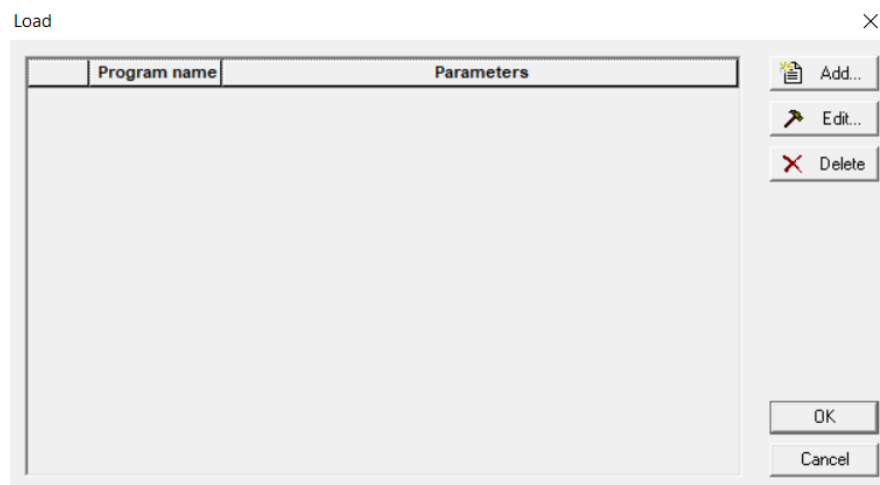


Рис. 1.16. Діалогове вікно Load

Для додавання моделі навантаження в меню Load натискаємо на Add і в вікні що з'явилося створюю таку модель навантаження яка відповідає вітровим навантаженням (Рис. 1.17).

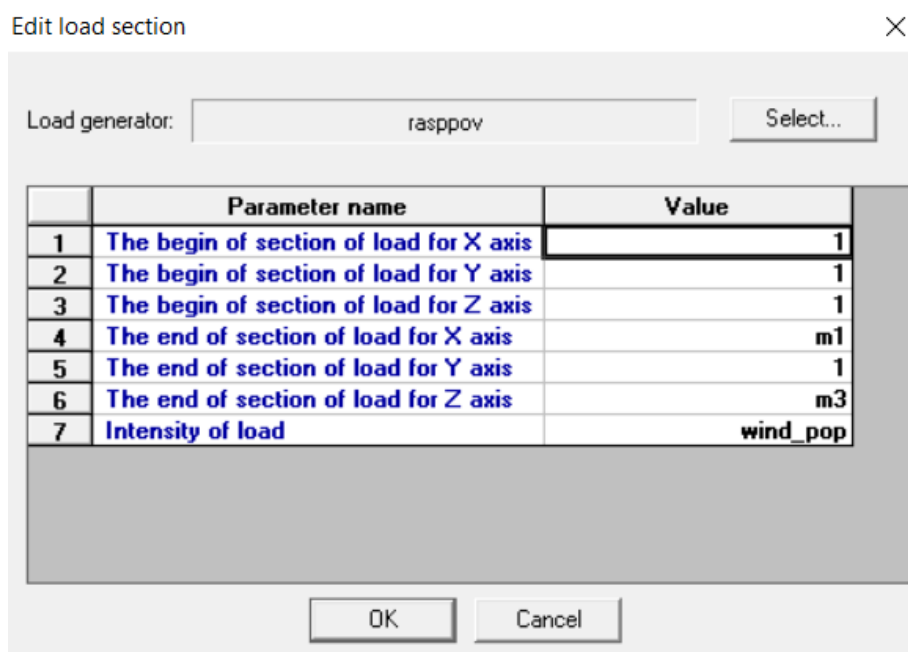


Рис. 1.17. Діалогове вікно Edit load section

Виконавши такі дії я отримав вітрові навантаження, що діють на мостовий перехід аміакопроводу через р. Дніпро.

## 2. Розрахунки АПРОКС

Дані для проведення розрахунків були взяті з сайту прогноз погоди GISMETEO за останні п'ять років.

За допомогою діалогового вікна Algorithm (рис. 2.1) створюю алгоритми розрахунку мостового переходу від дії вітрових навантажень, для кожної пори року на протязі останніх п'яти років.

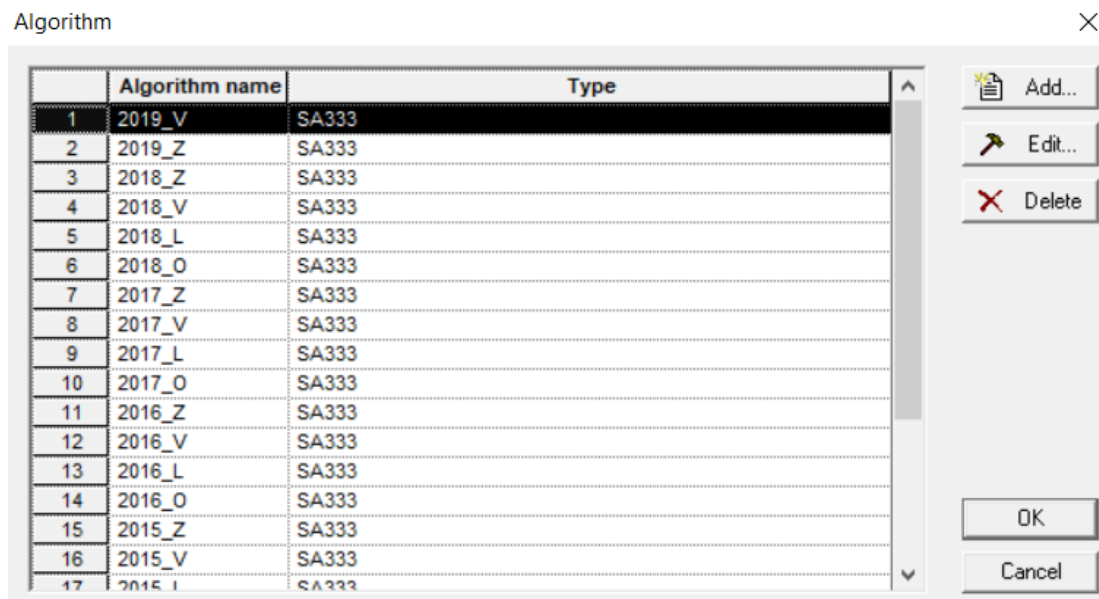


Рис. 2.1. Алгоритми розрахунків

Задаю необхідні параметри (кут та швидкість вітру взяті з GISMETEO) для певної пори року, далі на панелі задач вибираємо start solver. В діалоговому вікні, що з'явилося, вибираю алгоритм і натискаю кнопку start (рис. 2.2).

Після проведення розрахунків переходжу в режим перегляду результатів (Рис. 2.3, Рис. 2.4). В якому показано величину переміщення та напруження, які виникли в фермі жорсткості мостового переходу, а також елементи, які були найбільш навантажені.



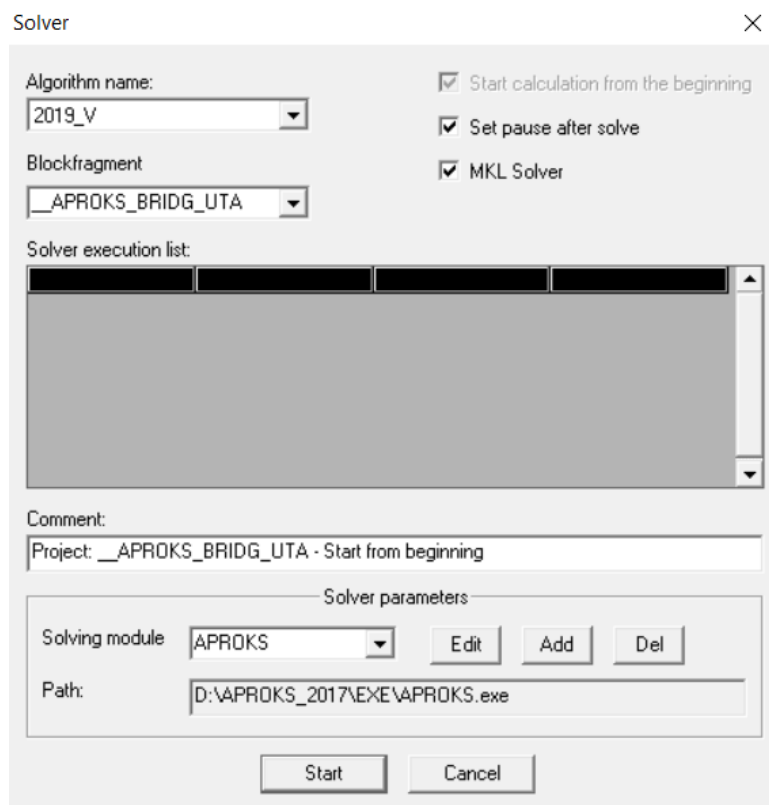


Рис. 2.2. Діалогове вікно Solver

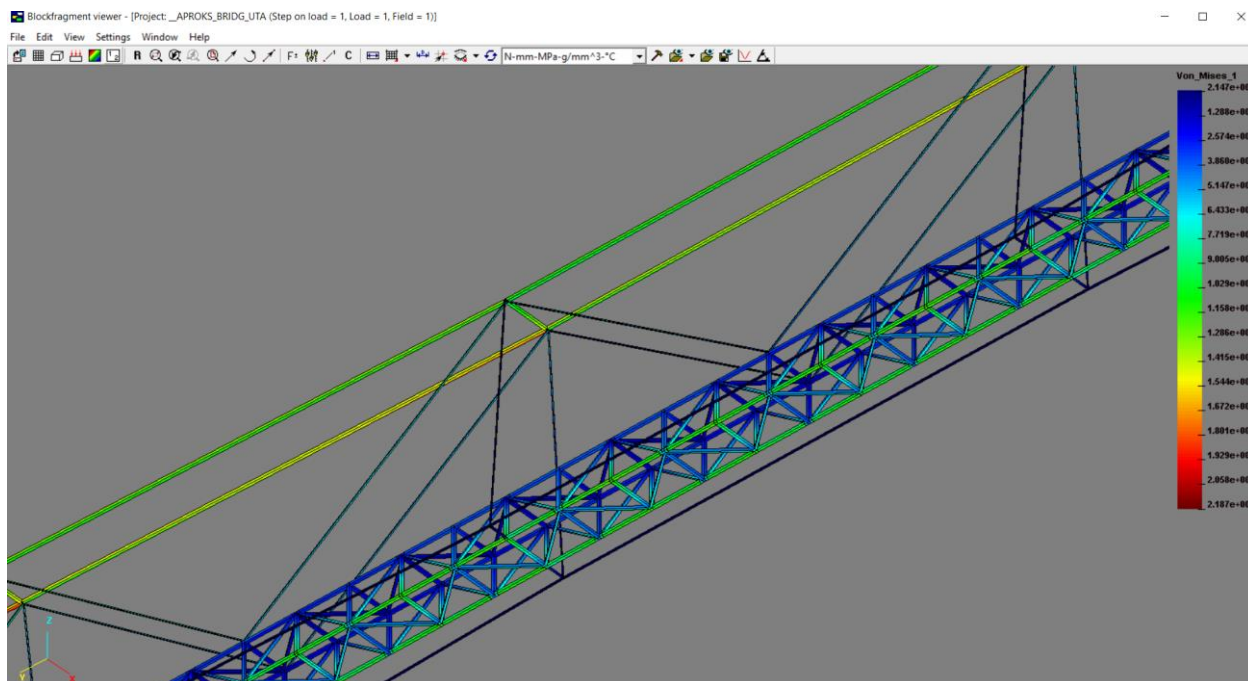


Рис.2.3. Blockfragment viewer

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

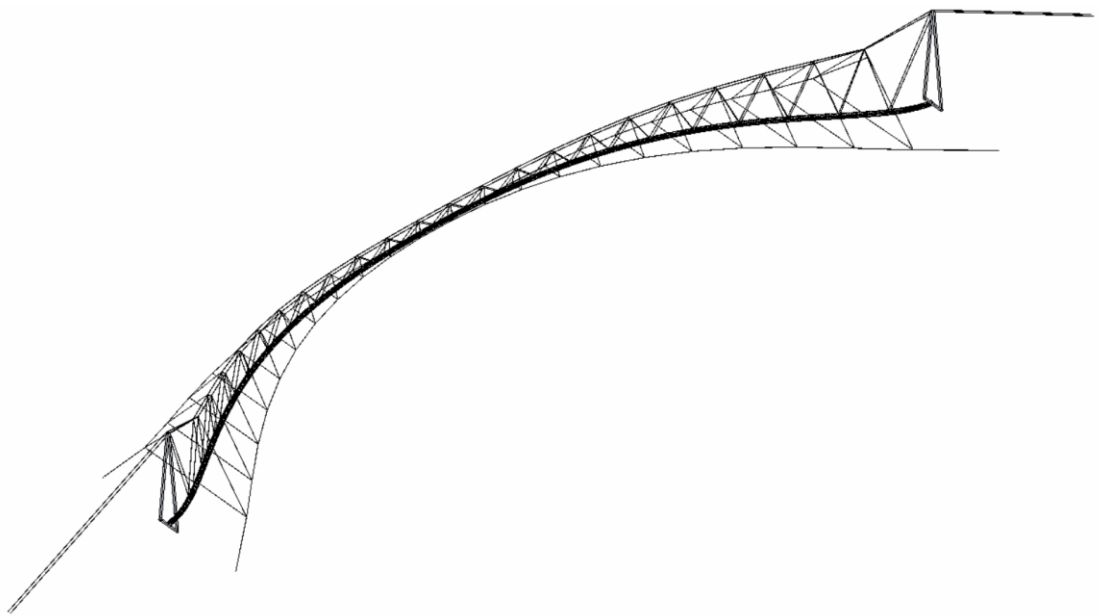


Рис. 2.4. Деформація мостового переходу від дії вітрових навантажень в масштабі 500:1

Дані, які були отримані, заносимо в ексел та оформляєм графіки напружень (Рис. 2.5) і переміщень (Рис. 2.6), які виникали в мостовому переході протягом останніх п'яти років експлуатації.



Рис. 2.5. Графік отриманих напружень.



Рис. 2.6. Графік величини переміщень мостового переходу.

### 3. Розрахунок підструктури

Для більш точної оцінки стану мостового переходу, було побудовано підструктуру в системі автоматизованого проектування CATIA. Далі проведено експортування 3D моделі підструктури в середовище системи ABAQUS (Рис. 3.1). В якості граничних умов були передбачені переміщення, які розраховані в глобальному завданні.

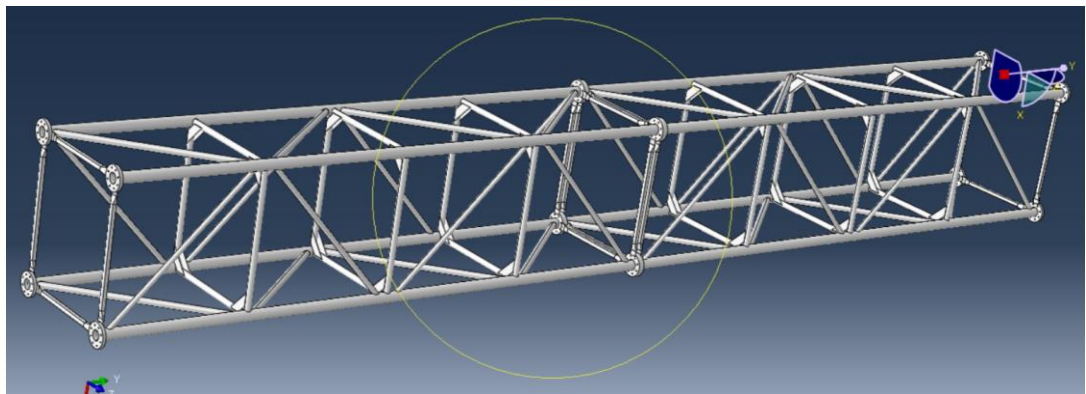


Рис. 3.1. 3D модель підструктури

Після проведення розрахунків отримано деформовану модель (Рис. 3.2), та картини муарів розподілу напружень в 3D моделі секції (Рис. 3.3 – 3.6).

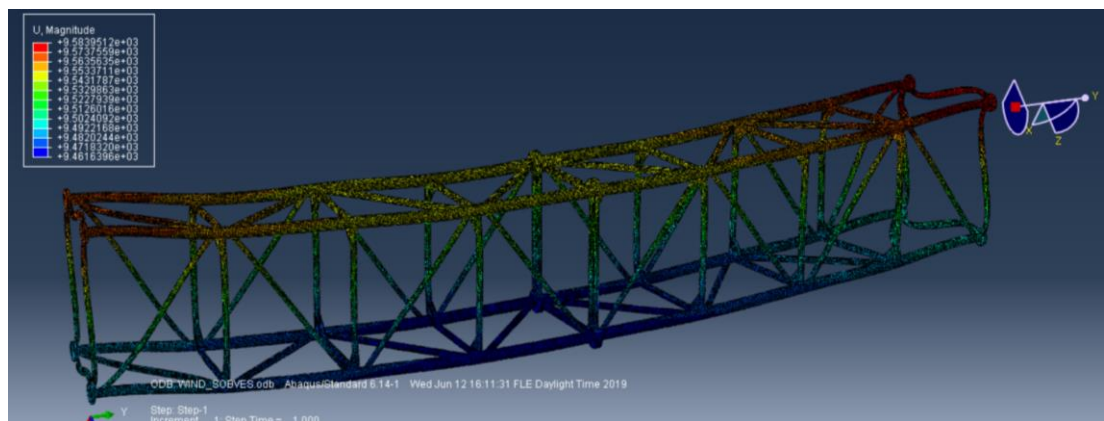


Рис. 3.2. Деформована підструктура

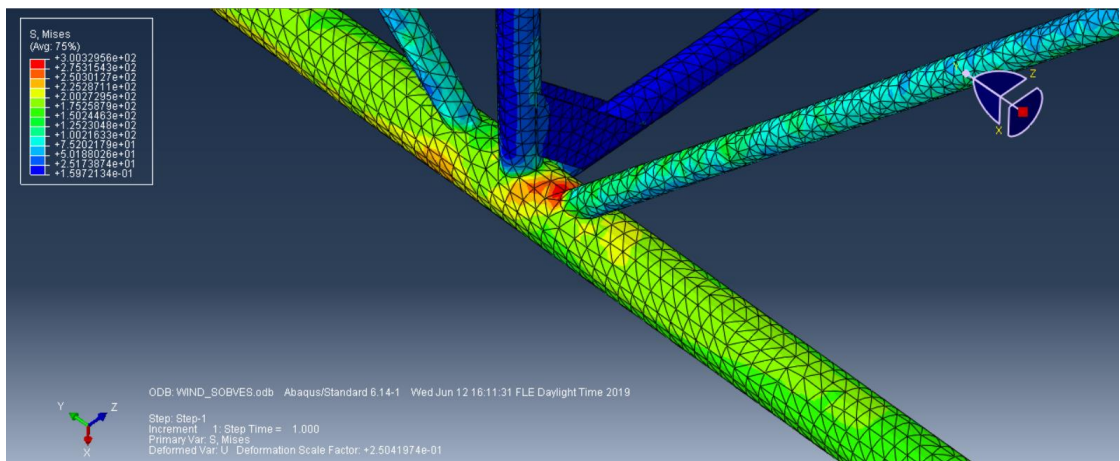


Рис. 3.3. Розподіл  $\sigma_{11}$

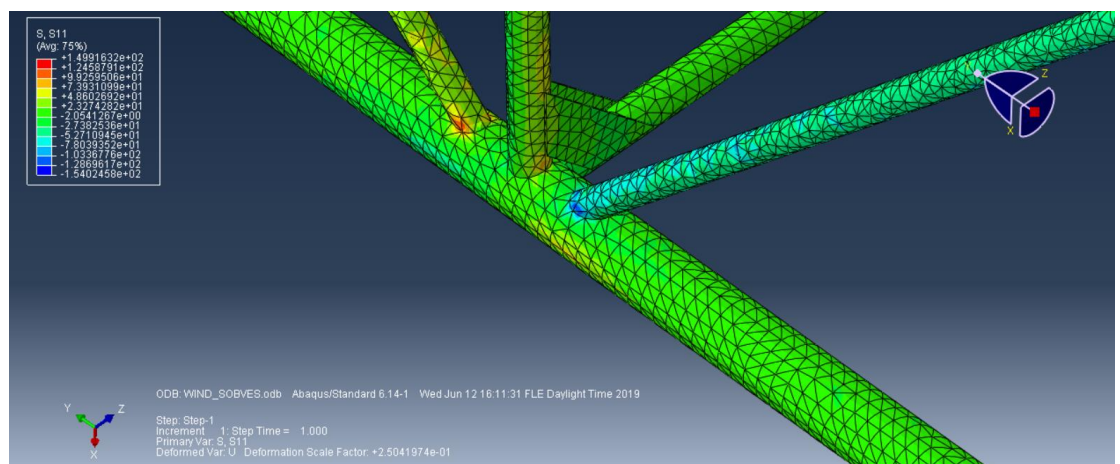


Рис. 3.4. Розподіл  $\sigma_{22}$

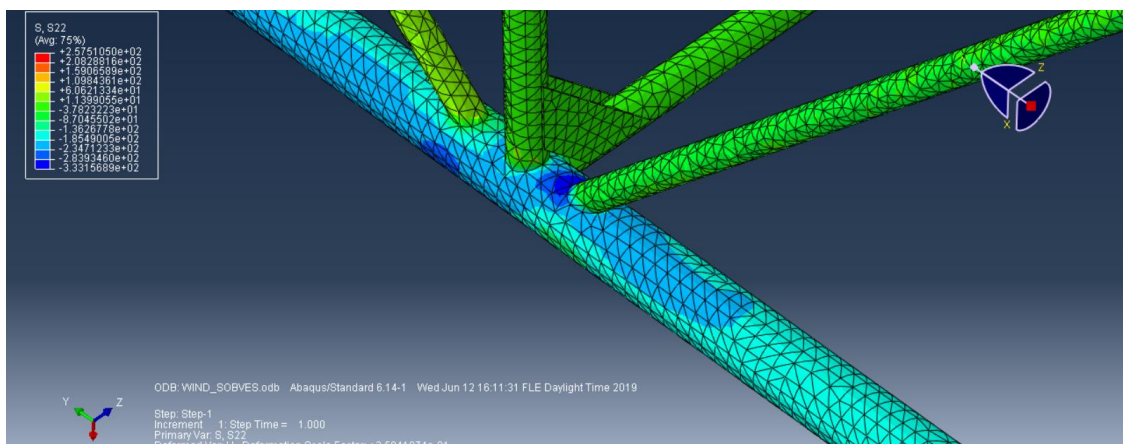


Рис. 3.5. Розподіл  $\sigma_{33}$

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

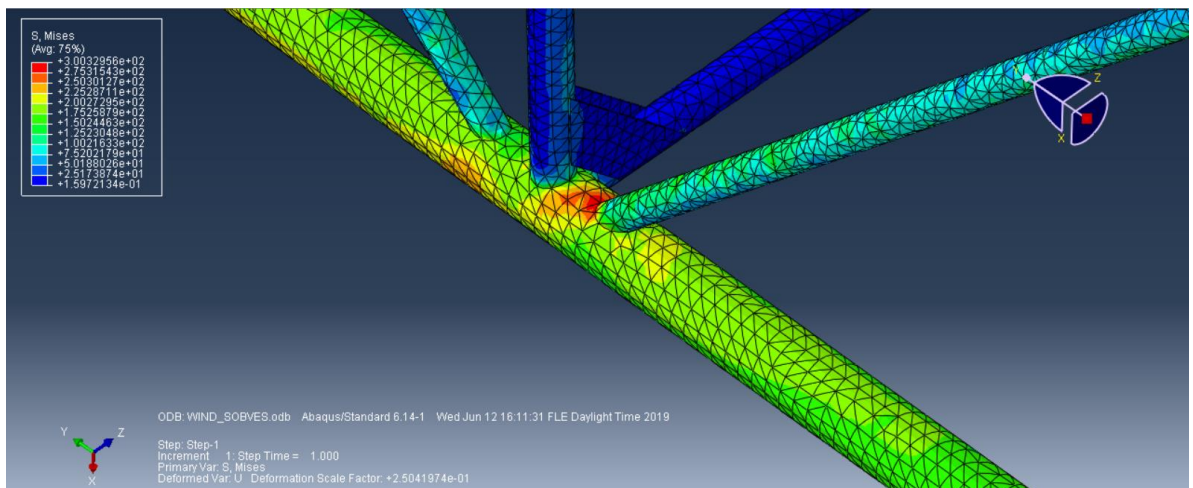


Рис. 3.6. Напруження по Мізесу в вузлу

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту на тему «Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень» отримано такі результати:

1. Програмний код системи генерації скінчено елементної моделі мостового переходу для вирішення глобальної задачі.

2. Розрахунки компонентів тензора напружень і вектори переміщень глобальної задачі мостового переходу виконано в системі автоматизації розрахунків на міцність АПРОКС, за допомогою алгоритму SA333 .

3. За результатами розрахунку отримано історію деформування мостового переходу за останніх п'ять років експлуатації. Побудовані відповідні графіки для зони з найбільшим напруженим станом.

4. На базі системи САПІА створена 3D модель підструктури двох секцій конструкції переходу аміакопроводу через р. Дніпро.

5. Виконана дискретизація підструктури в системі Abaqus. Отримана скінчена елементна модель.

6. На базі алгоритму вимушених переміщень системи Abaqus (переміщення були отримані в системі АПРОКС) отримані уточнені результати компонента тензора напружень.

7. В результаті аналізу даних розрахунків підструктури виявлено концентратори напружень і слабкі місця конструкції несучої ферми мостового переходу через р. Дніпро.

8. Виконано оцінку залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень.

					ЛП-51(1).101696.01-70PP	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконано дипломний проект на тему «Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень» за мету якого було поставлено вивчити призначення, конструкцію мостового переходу та оцінити його залишкову міцність від дії вітрових навантажень.

Було проведено виконання наступних етапів:

- Розглянуто галузі застосування аміаку;
- Проаналізовано технічні параметри та характеристики моста;
- Проведено літературний пошук, в результаті якого були проаналізовані мостові переходи, які схожі за конструкцією до мостового переходу аміакопроводу Тольятті-Одеса через р. Дніпро;
- Описано конструкцію мостового переходу через р. Дніпро;
- Проаналізовано негативні фактори впливу на працівника ремонтної бригади під час проведення ремонтних робіт та розроблено заходи з охорони праці.
- Розглянуто суть математичної моделі.
- Обрано для розрахунків метод скінченних елементів;
- Було виявлено переваги програмного забезпечення АПРОКС над його конкурентами;
- Отримано програмний код системи генерації скінчено елементної моделі мостового переходу для вирішення глобальної задачі.
- Розрахунки компонентів тензора напружень і вектори переміщень глобальної задачі мостового переходу виконано в системі автоматизації розрахунків на міцність АПРОКС, за допомогою алгоритму SA333 .
- За результатами розрахунку отримано історію деформування мостового переходу за останніх п'ять років експлуатації. Побудовані відповідні графіки для зони з найбільшим напруженим станом.

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



- На базі системи САТІА створена 3D модель підструктури двох секцій конструкції переходу аміакопроводу через р. Дніпро.
- Виконана дискретизація підструктури в системі Abaqus. Отримана скінчена елементна модель.
- На базі алгоритму вимушених переміщень системи Abaqus (переміщення були отримані в системі АПРОКС) отримані уточнені результати компонента тензора напружень.
- В результаті аналізу даних розрахунків підструктури виявлено концентратори напружень і слабкі місця конструкції несучої ферми мостового переходу через р. Дніпро.
- Виконано оцінку залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро від дії вітрових навантажень.

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## Список використаних джерел та матеріалів

1. Метод конечных элементов в механике твердых тел. / Под общ. ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. - 480 с.
2. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с., ил.
3. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 504 с.
4. Д. Брок Основы механики разрушения. – М.: Высш. школа, 1980. – 368с..
5. Сахаров О.С. САПР. Застосування програмного комплексу ВЕСНА в розрахунках процесів і обладнання з врахуванням термосилових навантажень - Навчальний посібник / Сахаров О.С., Гондляр О.В., Сівецький В.І., Щербина В.Ю. // К.: Т«ЕКМО», 2008 р. – 180с.: іл. -180 с.
6. Сахаров О.С. САПР. Інтегрована система моделювання технологічних процесів і розрахунку обладнання хімічної промисловості / Сахаров А.С., Гондляр А.В., Сівецький В.І., Щербина В.Ю. // К.: ТОВ «Поліграф Консалтинг», 2006, -156 с.
7. Сахаров О.С. САПР. Автоматизоване конструкторське та технологічне проектування з використанням AutoLisp . - Навчальний посібник / Сахаров О.С. Гондляр А.В., Сівецький В.Ю. Щербина В.Ю. // К.: Т«ЕКМО», 2008 р. – 208с.: іл. -208 с.
8. Сахаров О.С. САПР. Програмування на функціональній мові AutoLISP при проектуванні технологічного обладнання. – Підручник / Сахаров О.С., Гондляр О.В., Сівецький В.І., Щербина В.Ю. // К.: Видавництво —ЕКМО, 2010. -154 с.

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

9. Гондлях А.В. Итерационно-аналитическая теория деформирования многослойных оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. - К.: Будивельник.-1988.-N53.-с.33-37.

10. Баженов В.А. Нелинейные задачи механики многослойных оболочек / Баженов В.А., Сахаров А.С., Гондлях А.В., Мельников С.Л. // Монография. - К.: НД Будмехан ки.-1994.-264с.

11. Сахаров, О. С. Модификация метода Ритца для расчета массивных тел на основе полиномиальных разложений с учетом жестких смещений // Сопротивление материалов и теория сооружений. — К.: Будівельник. 1974. — № 23. — С. 47-52.

12. Сахаров, О. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел // К.: Вища школа, 1982, С. 214–279.

13. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.-Л.:ГИТЛ, 1948.

14. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести // М.: Машиностроение, 1975. – 400 с..

15. САПР. Система інформаційної підтримки життєвого циклу захисних оболонок та обладнання АЕС/О. В. Гондлях, В. І. Сівецький, В. Ю. Щербина, А. О. Чемерис, В. Ю. Онопрієнко. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 190с. – Бібліогр. : с. 182-187. – 300пр.

16. Гондлях О.В., Сахаров О.С., Щербина В.Ю., Сівецький В.І., Чемерис А.О. С19 САПР. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ХІМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ. Частина 1. ПРУЖНІ МУФТИ . — К.: ВП «Едельвейс», 2011. -172 С.

					ЛП-51(1).101696.01-70ДП	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

**Додаток**  
**до дипломного проекту на тему:**  
**«Оцінка залишкової міцності аміакопроводу через р. Дніпро**  
**від дії вітрових навантажень»**

**Київ 2019**

[illegible]

## Розробка 3D моделі фермової конструкції для подальшого її розрахунку методом скінченних елементів

Писаренко О.О., Устенко О.О., Мамчур О.В., Оніщук О.А., Гондлях О.В., Чемерис А.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ;

*Розробка 3D моделі фермової конструкції шляхопроводу для подальшого її розрахунку методом скінченних елементів.*

*Ключові слова: аміак, аміакопровід, 3D конструкція, метод скінченних елементів, шляхопровід.*

**Вступ.** Аміак має велике промислове значення. В основному він використовується для виробництва добрив і є початковим продуктом для промислового синтезу багатьох хімічних речовин. Азотну кислоту отримують виключно з аміаку. Аміак виробляють зазвичай на великих підприємствах з продуктивністю до 1 тис. Т / добу. Для подальшої переробки аміак транспортують на інші підприємства автомобільним, залізничним транспортом або по трубопроводах. Аміак транспортують або в зрідженому вигляді, або охолодженим. Світове виробництво аміаку приблизно збігається з кількістю зі світовим виробництвом хлору.

Найбільший в Європі магістральний аміакопровід з Тольятті-Горлівка до Одеси протяжністю 2427 км. Система аміакопроводу вперше в світовій практиці оснащена телеконтролем і телекеруванням, що дозволяють автоматизувати весь процес транспортування аміаку. Аміакопровід розрахований на подачу 25 млн.Т. аміаку на рік і має 30 роздавальних станцій, які дозволяють забезпечити сільське господарство ряду областей України рідким аміаком - ефективним азотним добривом.

Аміаку присвоєно IV клас небезпеки, що вказує на те, що аміак є небезпечною речовиною для здоров'я і життя людей та навколишнього середовища, в зв'язку з цим аміакопроводу присвоєно статус стратегічного об'єкту. Важливою задачею є контроль за технічним станом даного об'єкту.

Контроль технічного стану висячого моста через р. Дніпро (рис.1.1), проводиться традиційними методами моніторингу мостових конструкцій, які передбачають його періодичний візуальний огляд службою експлуатації та більш детальні, один раз в 3-5 років, обстеження конструкції спеціалізованою організацією.

Міст являє собою висячу систему, основними елементами якої являються:

- висяча вертикальна ферма прольотом 720 м, що складається з несучих кабелів, розкосів (похилих підвісок) і ґратчастої балки жорсткості (рис. 1.2; рис. 1.3);
- два берегових пілона;

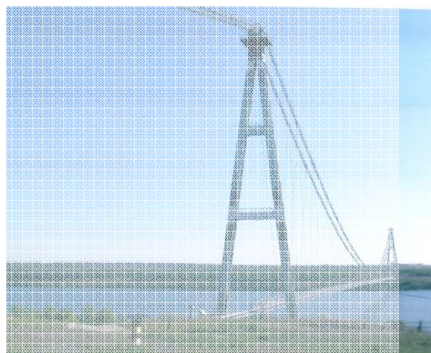


Рис.1.1 Трубопровідний міст для транспортування аміаку

- двопоясна горизонтальна вітрова система, що складається з поясів і горизонтальних відтяжок.

В даний час з'явилась необхідність для об'єктивної оцінки життєвого циклу моста. Розробка системи інформаційної підтримки життєвого циклу споруд в даній роботі виконується на базі використання сучасних чисельних методів оцінки напружено-деформованого стану мосту.

Для вирішення задачі по визначенню напружено-деформованого стану, надійності та оцінки залишкової міцності шляхопроводу використовується метод скінченних елементів.

Нижче приведені окремі вузли мосту аміакопроводу в яких під час перевірки було виявлено дефекти, та їх 3D моделі побудовані в системі Catia.

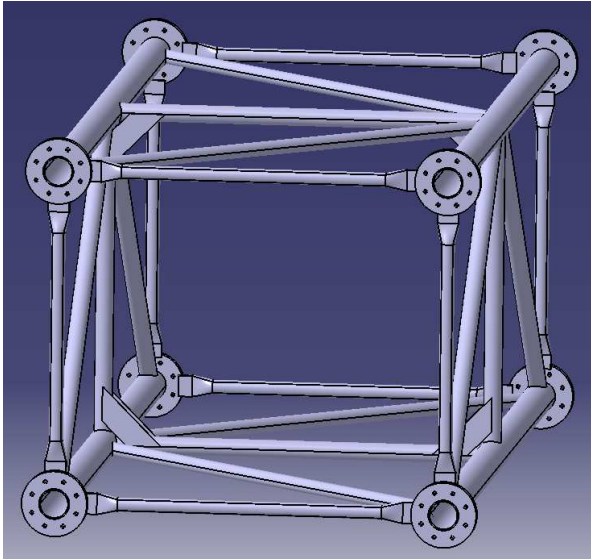


Рис.1.2 3D модель секції фермової конструкції побудована в системі Catia



Рис.1.3 Фото фермової конструкції аміакопроводу

Фасонка фермової конструкції аміакопроводу (рис. 1.4; рис. 1.5).

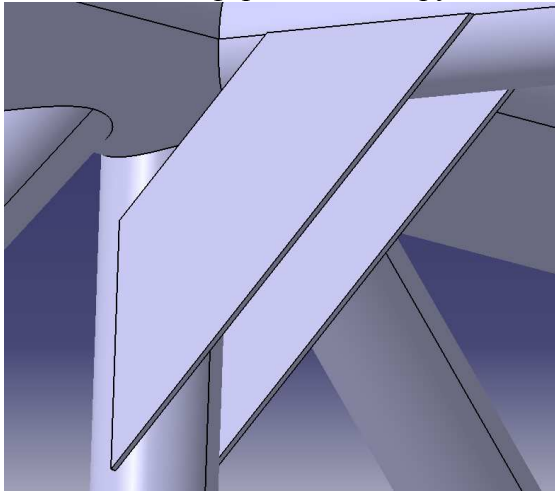


Рис.1.4 3D модель фасонки фермової конструкції побудована в системі Catia



Рис.1.5 Фото фасонки фермової конструкції аміакопроводу з зафіксованим дефектом

Вузол з'єднання вертикальної стійки з фланцем (рис. 1.6; рис. 1.7).

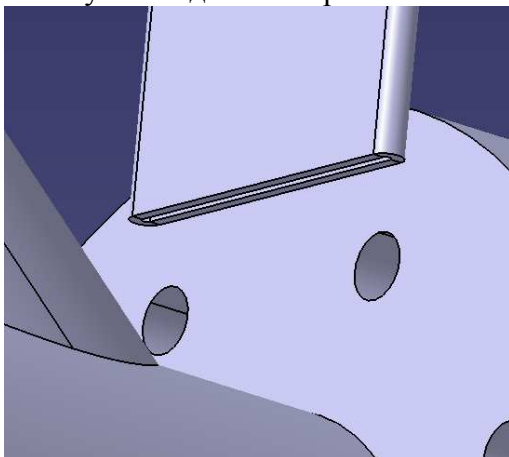


Рис.1.6 3D модель вузла з'єднання вертикальної стійки з фланцем побудована в системі Catia



Рис.1.7 Фото вузла з'єднання вертикальної стійки з фланцем аміакопроводу з зафіксованими слідами корозії



Болти з гайками, що використовуються для зчеплення секцій фермових конструкцій (рис. 1.8; рис. 1.9).

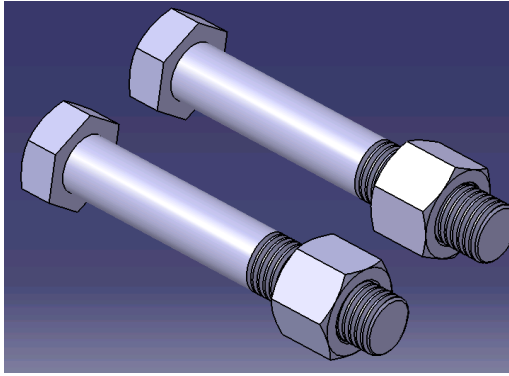


Рис.1.8 3D модель болтів з гайками, що використовуються для зчеплення секцій фермових конструкцій побудована в системі Catia

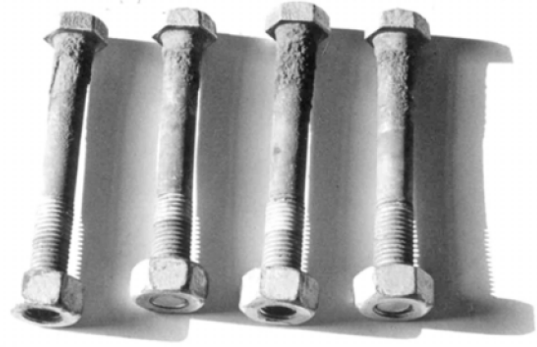


Рис.1.9 Фото болтів з гайками, що використовуються для зчеплення секцій фермових конструкцій з зафіксованими слідами корозії

Вертикальні стійки фермової конструкції (рис. 1.10; рис 1.11).

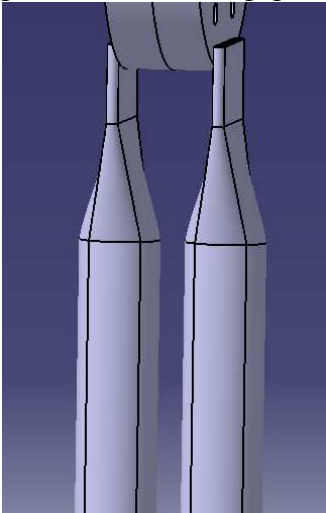


Рис.1.10 3D модель вертикальних стійок фермової конструкції побудована в системі Catia

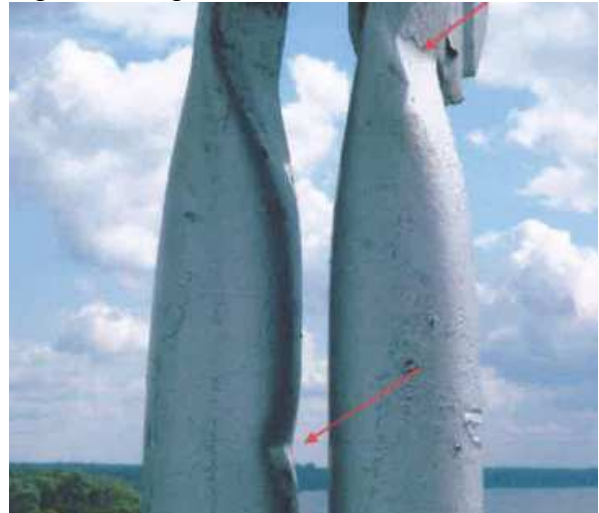


Рис.1.11 Фото вертикальних стійок фермової конструкції з зафіксованими місцевими деформаціями

Секція фермової конструкції розбита на сітку скінченних елементів (рис. 1.12). Було проведено випробовування дискретизації моделей вузлів ферми жорсткості в системах Catia, Abaqus, Ansys, Aproxs.

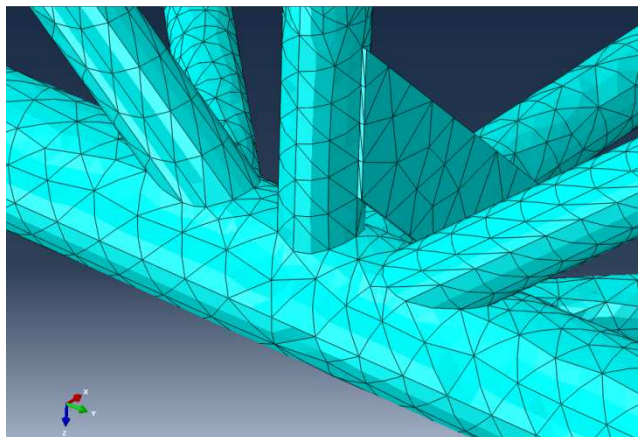
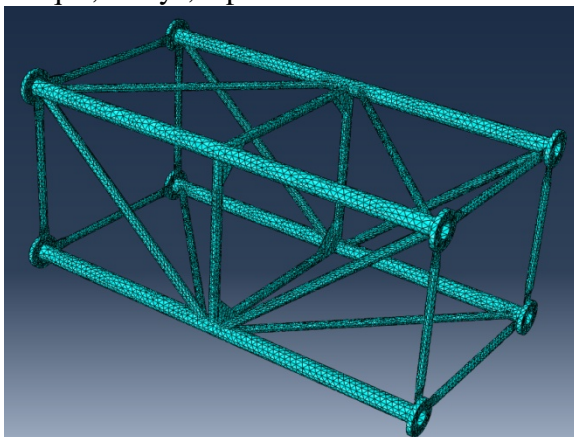


Рис.1.12 3D модель секції фермової конструкції розбита на сітку скінченних елементів

**Висновок.** Розроблено 3D модель секції фермової конструкції в системі Catia. Наступним етапом даної роботи є розрахунок напружено-деформованого стану побудованої моделі в системах Catia, Abaqus, Ansys, Aproxs.



## **Вплив залишкових напружень на утворення дефектів в елементах ферми жорсткості аміакопроводу в процесі її експлуатації**

Оніщук О.А., Мамчур О.В., Гондляр О.В., доктор наук, професор, Чемерис А.О. к.т.н., доцент  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### *Визначенні причини виникнення дефектів в конструкції ферми аміакопроводу*

Споруда магістрального аміакопроводу Тольятті-Одеса була побудована 1981 р. та експлуатується вже протягом 40 років, однією з основних проблем при розробці систем інформаційної підтримки є відновлення історії деформування з моменту початку його експлуатації. Важливу увагу потребують елементи конструкції в яких спостерігається відхилення від початкового проектного стану (локальна втрата стійкості окремих елементів з виникненням зон пластичного деформування (рис.1), викривлення форми (рис.2), корозія (рис.3), зони з тріщинами (рис.4) і т.п.).



Рис.1. Локальна втрата стійкості фланця з виникненням зон пластичного деформування



Рис.2. Викривлення форми елементів



Рис.3. Дефект корозійного типу



Рис.4. Тріщини в ролику і фланці

Також актуальним є правильне врахування зміни фізико-механічних властивостей елементів конструкцій мосту за рахунок накопичення мікропошкоджень у матеріалі, що можуть виникати за рахунок циклічного характеру змін зовнішнього навантаження, а також зміни температури в режимах «день-ніч», «зима-літо».

Коректне врахування цих факторів дає інформацію про залишкові напруження та деформації, які діють в конструкції в даний момент, що є дуже важливим для оцінки залишкової міцності шляхопроводу. В даній роботі на базі чисельного моделювання [1-2] зроблений аналіз рівня залишкових напружень, які виникають в фланцевій стойці ферми жорсткості на етапі її виготовлення. Результати приведені на рис.5,6.

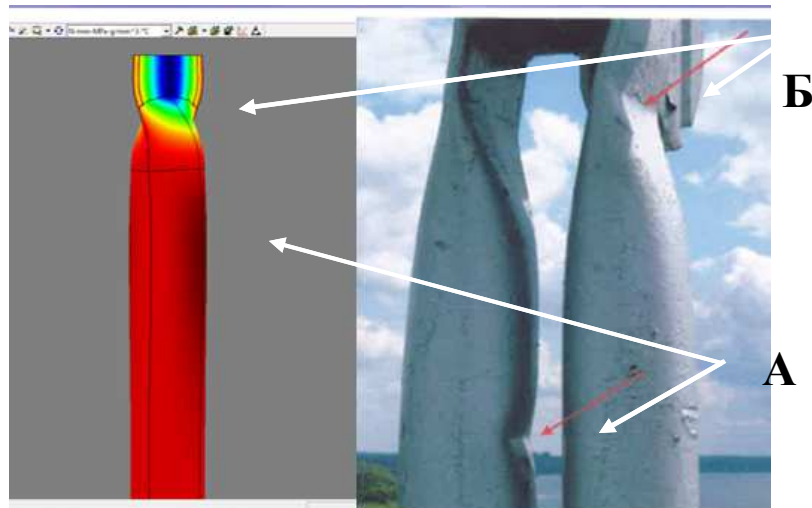


Рис.5. Пошкодження у фланці стойки ферми жорсткості

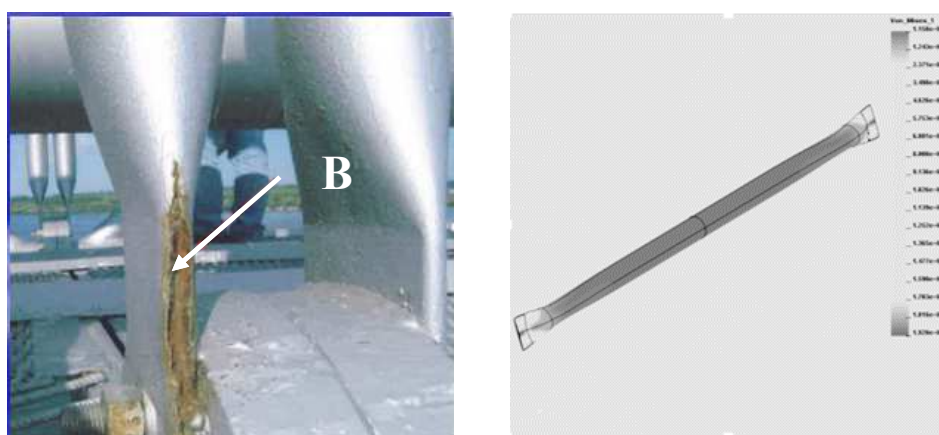


Рис.6. Тріщина в фланці стойки ферми жорсткості.

При порівнянні результатів числового експерименту з результатами візуального огляду цього елемента (2018 р.) можна зробити висновки, що:

1. Виникнення зони місцевої втрати стійкості в циліндричній частині стойки (зона А, рис.5) сприяє підвищений рівень залишкових напружень;
2. Виникнення дефекту (зона Б, рис.5) сприяють залишкові напруження в місці розширення фланця;
3. Виникнення тріщини (зона В, рис.6) зумовлено наявністю залишкових напружень і деформацій, які були утворені під час виготовлення фланця стойки ферми жорсткості.

#### Література

1. Gondliakh O., Onoprienko V., Nikitin R. Numerical Simulation of crack propagation in bimetallic spatial structures // Technology audit and production reserves. Vol 3, No 1 2014, pp. 23-27.
2. O. Gondliakh, V. Krytskyi, V. Onopriienko, A. Chemerys, N. Krytska. Computer Analysis of Thermomechanical State of Sealing Steel Lining for Containment of NPPs with VVER-1000/V-320 in Emergencies // Nuclear and Radiation Safety Journal . - 2017: № 4 (76). - С. 28-39.

## **Автоматизована система інформаційної підтримки життєвого циклу аміакопроводу**

Оніщук О.А., Гондляр О.В., доктор наук, професор, Чемерис А.О. к.т.н., доцент  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Описані основні положення автоматизованої система інформаційної підтримки життєвого циклу аміакопроводу*

Магістральний аміакопровод – це унікальний у світі високотехнологічний комплекс, який функціонує як єдина транспортна система, яка була побудована наприкінці 70-х років спеціально для транспортування основної продукції Тольяттинського азотного заводу на експорт. Трубопровід СРСР допомагали будувати американці. Труби були зроблені у Франції. Вони мають товщину 8 мм і діаметр 355.6 мм. Крім того, в місцях підвищеної небезпеки, а також в безпосередній близькості від водойм, був застосований принцип «подвійної труби», що забезпечує додатковий захист від корозії стінок труб, а також - витримку дуже високого тиску. Товщина труб збільшується до 13 мм, а між трубами міститься азот. Тож експлуатація аміакопроводу цілком безпечна, про що свідчить відсутність аварій протягом сорока років.

Оскільки аміак має IV клас небезпеки і являє собою небезпечну речовину для здоров'я людей та навколишнього середовища[1], то аміакопровод відноситься до складу стратегічних об'єктів України, а контроль за технічним станом та забезпечення його безаварійної роботи є важливою задачею.

Контроль стану висячого моста через р. Дніпро прольотом 720 м на трасі аміакопроводу Тольятті-Одеса (рис.1), полягає в традиційних методах моніторингу мостових конструкцій, які передбачають його періодичний візуальний огляд службою експлуатації та детальні, один раз в 3-5 років, обстеження конструкцій спеціалізованою організацією.



Рис.1. Висячий міст через р. Дніпро на трасі аміакопроводу

Така процедура моніторингу не забезпечує умови безперервного збору інформації про вплив зовнішніх факторів при його експлуатації та не дозволяє вчасно об'єктивно оцінити технічний стан мосту. Тим більше, що в процесі експлуатації даного об'єкта протягом 40 років, після планових оглядів виявлені зони локальної втрати стійкості елементів конструкцій, зони руйнування та корозії елементів мосту. Тому в даний час з'явилась необхідність для об'єктивної оцінки життєвого циклу моста. Розробка системи інформаційної підтримки життєвого циклу споруд в даній роботі виконується на базі використання сучасних чисельних методів оцінки напружено-деформованого стану мосту [2], [3].

Принцип збору інформації для коректної роботи даної системи полягає в тому, що метеорологічні дані надходять в програму для розрахунків не тільки з датчиків, розташованих на мосту, а також беруться з актуальної метеорологічної карти. Також спеціально розроблена підсистема для врахування змін у напружено-деформованому стані моста у випадка стихійних лих (землетрус, смерч, ураган та т.п.). Такий підхід забезпечує безперервний режим моніторингу за технічним станом цього відповідального об'єкту.

#### Література

1. ГОСТ 12.1.007-76 01.01.1977р.
2. Gondliakh O., Onoprienko V., Nikitin R. Numerical Simulation of crack propagation in bimetallic spatial structures // Technology audit and production reserves. Vol 3, No 1(17) 2014, pp. 23-27.
3. O. Gondliakh, V. Krytskyi, V. Onopriienko, A. Chemerys, N. Krytska. Computer Analysis of Thermomechanical State of Sealing Steel Lining for Containment of NPPs with VVER-1000/V-320 in Emergencies // Nuclear and Radiation Safety Journal . - 2017: № 4 (76). - С. 28-39.